



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

**ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ**

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**SKLÁDÁNÍ A TONE-MAPPING HDR OBRAZU**

HDR IMAGE ACQUISITION AND TONE-MAPPING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ERIK GUNIŠ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. SVETOZÁR NOSKO**

**BRNO 2018**

**Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií**

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2017/2018

**Zadání bakalářské práce**

Řešitel: **Guniš Erik A.**

Obor: Informační technologie

Téma: **Skládání a tone-mapping HDR obrazu**

**HDR Image Acquisition and Tone-Mapping**

Kategorie: Zpracování obrazu

**Pokyny:**

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se pořizování HDR obrazu ze sekvence snímků s různou expozicí a prostudujte základní metody tone-mappingu. Po konzultaci s vedoucím vyberte vhodnou metodu pro skládání a vyberte metody pro tone-mapping. Uvažujte statickou scénu.
2. Proveďte návrh programu demonstrujícího použití metod vybraných v předchozím bodě zadání. Program by měl umožňovat přepínání použitých operátorů a možnost konfigurovat parametry skládání a tone-mappingu.
3. Implementujte aplikaci, která ze sekvence snímků složí HDR obraz a aplikuje vybranou metodu tone-mappingu pro zobrazení.
4. Diskutujte dosažené výsledky a navrhněte možné pokračování práce.

**Literatura:**

- Reinhard, Erik, et al. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Nosko Svetozár, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
Fakulta informačních technologií  
Ústav počítačové grafiky a multimédií  
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký  
vedoucí ústavu

## Abstrakt

Bakalárská práca rozoberá problematiku spracovania HDR obrazu. Popisuje a rieši implementáciu skladania snímok s nízkym dynamickým rozsahom a vytvorenie snímky s vysokým dynamickým rozsahom. Ďalej sa zaoberá riešením problému zobrazenia snímky s vysokým dynamickým rozsahom. Táto problematika je riešená pomocou tónového mapovania.

## Abstract

Bachelor thesis deals with HDR image acquisition. Describes and solves implementation of acquisition of low dynamic range images and creating of high dynamic range image. It also deals with problem of displaying high dynamic range image. This issue is solved by tone-mapping.

## Kľúčové slová

Vysoký dynamický rozsah, fotografia, tónové mapovanie

## Keywords

High dynamic range, photography, tone mapping

## Citácia

GUNIŠ, Erik. *Skládání a tone-mapping HDR obrazu*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Svetožár Nosko

# Skládání a tone-mapping HDR obrazu

## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením Ing. Svetozára Noska. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

Erik Guniš

14. mája 2018

## Podakovanie

Chcel by som sa úprimne poďakovať vedúcemu práce pánovi Ing. Svetozárovi Noskovi za poskytnutú odbornú pomoc pri riešení tejto práce.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Problematika HDR</b>	<b>4</b>
2.1	Pojmy z oblasti fotografie . . . . .	4
2.2	História HDR . . . . .	9
2.3	Využitie HDR . . . . .	10
2.4	Vytvorenie HDR snímky . . . . .	11
2.4.1	Využitie techniky na vytvorenie HDR . . . . .	11
2.4.2	Využitie softwaru na vytvorenie HDR . . . . .	12
2.5	Zobrazenie HDR snímky . . . . .	15
2.5.1	Zobrazovacie technológie . . . . .	15
2.5.2	Tónové mapovanie . . . . .	16
2.6	Formát HDR snímok . . . . .	18
2.7	Dostupné programy na skladanie HDR obrazu . . . . .	19
2.8	Nežiadúce efekty . . . . .	20
2.9	HDR Video . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Špecifikácia zadania</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>Implementácia</b>	<b>27</b>
4.1	Využitie nástroje . . . . .	27
4.2	Grafické užívateľské rozhranie . . . . .	28
4.3	Implementácia algoritmov . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Vyhodnotenie</b>	<b>33</b>
5.1	Vyhodnotenie rýchlosti . . . . .	33
5.2	Porovnanie operátorov . . . . .	36
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>40</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>42</b>
<b>A</b>	<b>Obsah priloženého pamäťového média</b>	<b>44</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Ľudia sa snažili odpradávať zachytiť svet tak, ako ho vidia na vlastné oči. Začalo to pravekými maľbami a pokračuje až dodnes pomocou technických výtvarných nástrojov súčasnej doby. Dnešné zariadenia na zachytenie reality sa vyvíjajú obrovskou rýchlosťou. Napriek tomu stále nedokážeme zaznamenať a zobraziť obraz reálneho sveta pomocou technológií s takým dynamickým rozsahom, s akým ho vidí ľudské oko. Bolo by to nádherné keby dokážeme preniesť obraz, ktorý vidíme vlastnými očami a zobraziť ho v úplnej ekvivalencii na displeji.

Fotografovanie nádhornej krajiny pri západe slnka a zobrazenie tejto snímky so všetkými detailami a v plnej kvalite doma na televízori by bolo naozaj nádherné. Bohužiaľ sa tu stretávame s problémom zachytenia celkovej svetelnosti realnej scény, ale aj s problémom zobrazenia tejto scény na displejoch. Výsledkom je snímka, na ktorej nevyniknú detaily krajiny, kde stromy sú tmavé, nevýrazné, skaly čierne a nádherná časť so zapadajúcim slnkom je presvietená a nie je možné vidieť ani len obrysy slnka. V podstate ide o jav, kedy fotoaparát nedokázal zachytiť detaily v tmavých a svetlých miestach súčasne. Výsledkom bolo zachytenie iba obmedzeného rozsahu svetelnosti scény v porovnaní s tým, ako ho vidí ľudské oko. Tento jav viedol k strate veľkého množstva detailov. Riešením tohto problému sa zaoberá táto bakalárska práca. Ide o problematiku zloženia viacerých snímok s nízkym dynamickým rozsahom (anglicky LDR - Low Dynamic Range) a vytvorenie jednej snímky s vysokým dynamickým rozsahom (anglicky HDR - High Dynamic Range).

Riešením je zachytenie scény pomocou viacerých snímok s rôznou expozíciou a následným poskladaním snímok, čo bude mať za následok čiastočnú rekonštrukciu plného dynamického rozsahu scény. Princíp tejto metódy spočíva v tom, že jedna alebo viac snímok bude zachytených so zníženou expozíciou, aby bolo možné vidieť detaily v svetlých miestach a naopak, jedna alebo viac snímok bude zachytených so zvýšenou expozíciou, aby vynikli detaily v tmavých miestach. Následné spojenie týchto snímok nazývané ako skladanie snímok s nízkym dynamickým rozsahom vytvorí nádhernú snímku s vysokým dynamickým rozsahom, na ktorej budú spoločne zachytené detaily svetlých aj tmavých miest. Avšak zloženie týchto snímok nám žiaľ stačiť nebude.

Ďalším problémom, s ktorým sa stretávame, je nemožnosť zobrazenia týchto snímok pomocou bežne dostupných zobrazovacích technológií. Tento jav, kedy nie je možné zobrazenie snímky, ktorá poskytuje výhody vo všetkých oblastiach využitia fotografií, nás núti k hľadaniu riešenia ako zobraziť takúto snímku na bežnom displeji. Jedným z riešení je prevod tejto HDR snímky na LDR snímku so zachovaním množstva detailov vo svetlých a tmavých oblastiach. Spomínaná metóda sa nazýva tone-mapping. Konečným výsledkom bude program, ktorý zvládne pri vložení sekvencie LDR snímok vytvoriť HDR snímku a následný export tejto snímky, respektíve prevod do zobraziteľného formátu na displeji.

V kapitole 2.1 sú detailne popísané všetky náležitosti spojené s problematikou HDR. Ide o vysvetlenie pojmov, opis histórie tvorby HDR a využitie tejto technológie. Následne sa kapitola venuje popisu skladania snímok s nízkym dynamickým rozsahom, prevodom do zobraziteľného spektra displeja a rôznym problémom, ktoré pri tomto prevode môžu nastať. Koniec kapitoly pojednáva jednu z najnovších výdobytkov dnešnej doby - HDR video.

Kapitola 3 je venovaná popisu zadania a predbežného návrhu programu, jeho užívateľského rozhrania a popisu spôsobu akým bude riešené zostavenie tohto programu.

V nasledujúcej kapitole 4 je popísaná celková implementácia programu, využité prostriedky, programovací jazyk a všetky potrebné nástroje k zostrojeniu programu.

V kapitole 5 sa nachádzajú reálne výsledky testovania programu a experimentovanie s týmto programom.

Záverečná kapitola 6 sa venuje zhodnoteniu výsledkov testovania, samotnému porovnaniu experimentov a poukázaniu na možné rozšírenia tejto práce.

## Kapitola 2

# Problematika HDR

V dnešnom svete plnom technologických vychytávok neexistuje možnosť zachytiť a zobrazíť obraz reálneho sveta na obrazovkách v úplnej ekvivalencii k tomu, ako ho vidí ľudské oko. Súčasné bežné zariadenia nedokážu zachytiť plný rozsah svetelnosti scény. Vznikajú tak iba snímky s nízkym dynamickým rozsahom. Snímky, ktoré dokážu zachytiť plný alebo takmer plný rozsah svetelnosti scény sú snímky s vysokým dynamickým rozsahom. Vysoký dynamický rozsah alebo HDR je pojem, ktorý získava čoraz väčšiu popularitu, avšak je tu istá miera zložitosti vytvorenia týchto snímok.

K plnému pochopeniu problematiky HDR je potrebné si vysvetliť niektoré pojmy v oblasti fotografie a až následne je možné ponoriť sa do skúmania tejto problematiky.

### 2.1 Pojmy z oblasti fotografie

Základom vnímania obrazu je svetlo dopadajúce na oko odraňajúce sa od objektov[18]. Princíp zachytávania fotografií pomocou digitálnych fotoaparátov je veľmi podobný tomu, ako pracuje ľudské oko. Cez sústavu šošoviek je svetlo zaznamenávané na snímací čip (ďalej iba snímač), ktorý prevádza dopadajúce svetlo do číslicovej podoby. Dnešné fotoaparáty dokážu redukovať množstvo dopadajúceho svetla na snímač. K pochopeniu ako to funguje je potrebné si uviesť niektoré dôležité pojmy.

#### Viditeľné svetlo

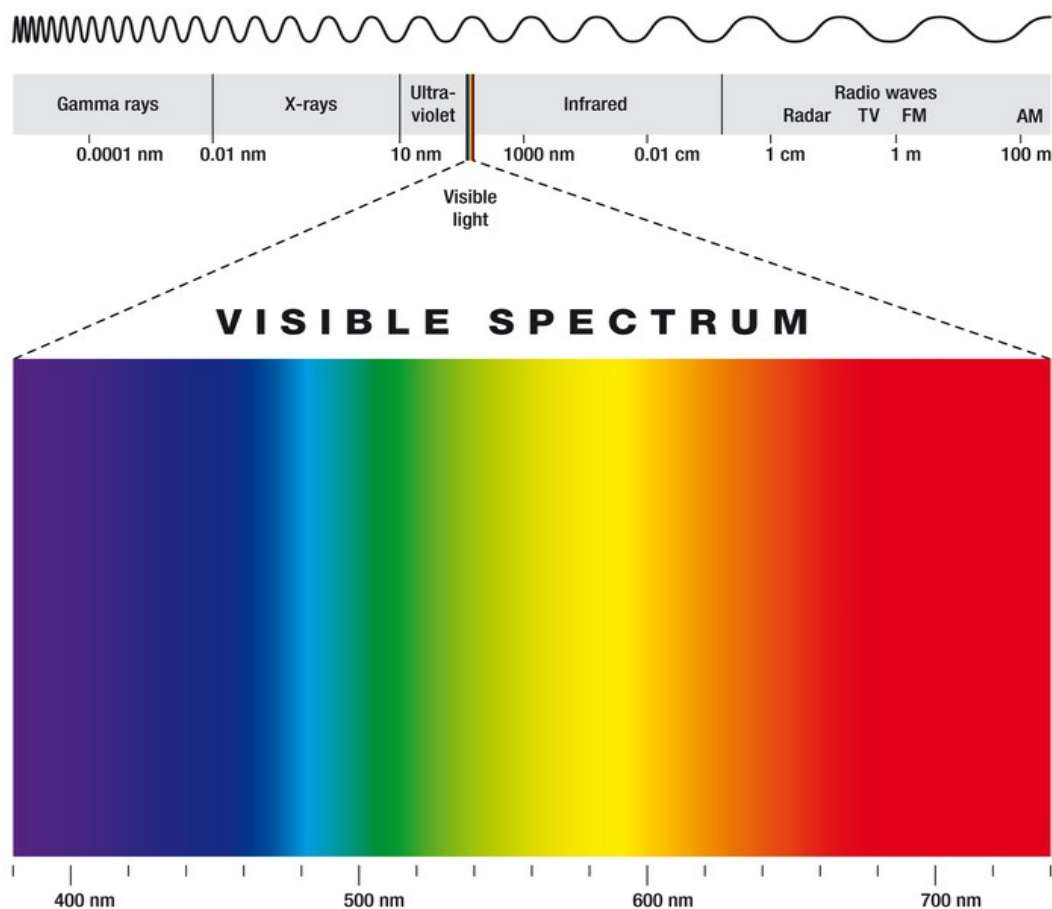
Elektromagnetické žiarenie[3] je prenos energie v podobe elektromagnetického vlnenia. Môže mať istú frekvenciu, podľa ktorej rozlišujeme, o aké žiarenie ide. Pri nízkych frekvenciách hovoríme o gama žiarení, ultrafialovom žiarení, poprípadе röntgentovom žiarení. Vysoké frekvencie nadobúda napríklad rádiové žiarenie.

Niekde v strede tohto spektra žiarení sa nachádza žiarenie, ktoré je viditeľné ľudským okom - viditeľné svetlo. Toto viditeľné spektrum (je možné vidieť na obr. 2.1) sa nachádza vo vlnovej dĺžke medzi 380 - 780 nm.<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>nanometer - jednotka veľkosti,  $10^{-9}$  metra





Obr. 2.1: Rozsah elektromagnetického žiarenia<sup>2</sup>

Toto viditeľné svetlo sa skladá z rôznych farieb. Farba je určená vzhľadom na vlnovú dĺžku. Ak vidím farbu na nejakom objekte, znamená to, že objekt pohlcuje všetky farby (vlnové dĺžky) okrem tej, ktorú vidíme. Táto viditeľná farba je odrážaná od objektu a naše oko ju dokáže zachytiť.

### Expozičný čas

Je veličina, ktorá určuje akú dlhú dobu dopadá svetlo na snímač. V podstate je to doba, ako dlho je uzavierka fotoaparátu otvorená. V praxi to znamená, že vyšší expozičný čas prepustí viac svetla, snímka bude svetlejšia a nižší expozičný čas prepustí menej svetla, snímka bude tmavšia. Expozičný čas je udávaný v sekundách.

### Clona

Clona je zariadenie 2.4.1 vo fotoaparáte, ktoré umožňuje meniť veľkosť otvoru pomocou ktorého je svetlo prepúšťané na snímač. Veľkosť clony [12] sa udáva v clonovovom čísle označovnom ako F. Veľkosť sa dá vyjadriť pomocou nasledujúcej rovnice 2.1:

$$F = \frac{f}{d} \quad (2.1)$$

<sup>2</sup>Obrázok prevzatý z [https://s3.pixers.pics/pixers/700/F0/39/33/73/88/700\\_F039337388\\_a188331be08d91ec9f84fbcc6dcf0a57.jpg](https://s3.pixers.pics/pixers/700/F0/39/33/73/88/700_F039337388_a188331be08d91ec9f84fbcc6dcf0a57.jpg)

$F$  je clonové číslo,  $f$  je ohnisková vzdialenosť a  $d$  je priemer vstupného otvoru šošovky, respektíve priemer otvoru clony. Používa sa istý štandard clonových čísel začínajúcich na číslo 1. Každé ďalšie číslo v rade je  $\sqrt{2}$  násobkom toho predchádzajúceho čísla.

## ISO

Pojem ISO označuje mieru citlivosti čipu na dopadajúce svetlo. Uvádza sa v celých číslach, väčšinou ako násobky čísla 100. Menšie ISO znamená menšiu citlivosť fotoaparátu na svetlo. Naopak vyššie ISO znamená vyššiu citlivosť fotoaparátu na svetlo. Pri vyššom ISO čísle sa zvyšuje jas zachyteného obrazu, čo má za následok aj neželaný efekt v podobe šumu.

## Expozičná hodnota

Expozičná hodnota[6] označená ako EV (exposure value) je veličina, ktorá označuje absolútne množstvo dopadajúceho svetla na snímač. S expozičnou hodnotou súvisia všetky vyššie uvedené pojmy ako expozičný čas, clona a ISO. Pomocou zmien týchto veličín môžeme reagovať na zmenu osvetlenia. Expozičná hodnota sa bežne počíta pri citlivosti ISO 100. Táto hodnota sa meria na zápornej logaritmickej stupnici pri základe 2, teda zvýšenie o hodnotu 1 (EV) odpovedá polovici prepusteného svetla. Vzorec 2.2 pre výpočet je:

$$2 \log_2 N - \log_2 t \tag{2.2}$$

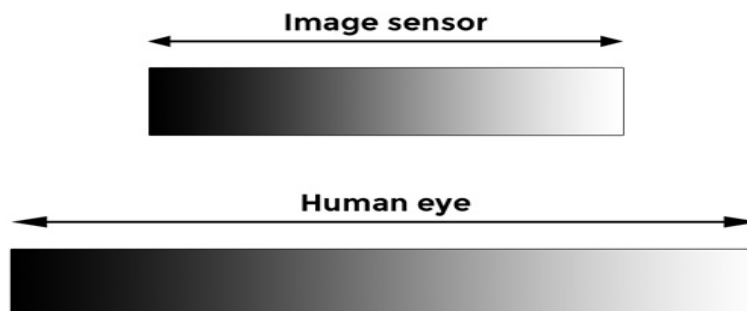
$N$  je clonové číslo a  $t$  je expozičný čas.

## Dynamický rozsah

Po vysvetlení všetkých predchádzajúcich pojmov môžeme prejsť k vysvetleniu toho najpodstatnejšieho. Dynamický rozsah je rozdiel medzi najsvetlejším a najtmavším miestom zachytenej fotografie. Tento rozdiel sa udáva v EV (Expozičná hodnota alebo Exposure Value)[5].

Pri fotografovaní sú častým problémom tzv. prepaly (príliš svetlé miesta na fotografii) a podpaly (príliš tmavé miesta na fotografii). Tento problém nastáva z dôvodu, že dynamický rozsah scény presahuje možnosti fotoaparátu. Ako bolo spomenuté na začiatku kapitoly 2, dnešné bežné fotoaparáty nedokážu zachytiť plný dynamický rozsah scény tak, ako to dokáže ľudské oko. To znamená, nie je možné zachytiť všetky detaily a to predovšetkým na miestach, kde sa svetelnosť líši od dynamického rozsahu fotoaparátu. Pre predstavu na obr. 2.2 je možné vidieť rozdiel medzi dynamickým rozsahom ľudského oka a bežným digitálnym fotoaparátom.

Snímky, ktoré sú zachytené bežnými fotoaparátmi a nedokážu pokryť rozsah snímanej scény nazývame LDR (low dynamic range) snímky a sú to snímky s nízkym dynamickým rozsahom.



Obr. 2.2: Rozdiel medzi dynamickým rozsahom snímacieho čipu a ľudského oka<sup>3</sup>

Naopak snímky, ktoré pokrývajú rozsah snímanej scény úplne alebo aspoň sa k tomu približujú, nazývame HDR (high dynamic range) snímky a sú to snímky s vysokým dynamickým rozsahom.

## Kontrast

Vďaka kontrastu je možné rozoznať priestorové postavenie objektov scény. Môže ísť o kontrast farebný alebo kontrast jasový. V prípade vyššieho kontrastu je možné jednoduchšie rozlíšiť toto postavenie objektov. Ľudské oko vníma kontrast veľmi citlivo a to môže spôsobiť klam, pri ktorom mozog vníma farbu objektu rôzne pri rôznych pozadiach toho istého objektu.

## Kontrastný pomer

Je označovaný pomer medzi najjasnejším a najmenej jasným bodom na snímke. Toto číslo znamená koľkokrát vyšší je najjasnejší bod oproti najtmavšiemu.

## Farebný priestor

Ľudské oko vníma svetlo iba o určitej vlnovej dĺžke, podľa ktorej sa určuje farba. Farebný priestor<sup>[1]</sup> je akási množina farieb nazývana aj gamut, ktorá je určená pre reprezentáciu farieb pomocou čísel. V tomto priestore sa nachádzajú všetky farby, ktoré je schopné zobraziť, respektíve vytlačiť. Každá farba v abstraktnom modeli má konkrétne súradnice. Farebné priestory sú označované podľa ich primárnych farieb.

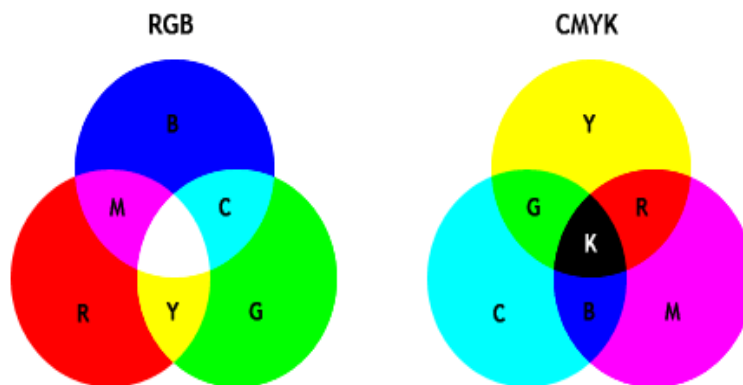
**CIE XYZ** Je jeden z historicky prvých farebných modelov a je akýmsi základom ostatných modelov. Tento priestor pracuje tak, že jeden parameter (Y) určuje jas a dva parametre (X,Z) určujú farbu.

**RGB** (možné vidieť na obr. 2.3) farebný priestor je momentálne jeden z najpoužívanejších farebných priestorov. Primárne farby modelu sú červená (**RED**), zelená (**GREEN**), modrá (**BLUE**). Dôvodom prečo vznikol tento farebný model, je ten, že ľudské oko má najvyššiu citlivosť na vlnové dĺžky práve týchto 3 farieb a všetky ostatné farby sú ich kombináciou. Farebný priestor je používaný predovšetkým v počítačovej grafike, kde každý pixel na displeji je reprezentovaný touto trojicou farieb. Výsledkom spojenia 3 základných farieb je čierna alebo biela (vzhľadom na intenzitu jasu, pri použití plného jasu týchto 3 farieb vznikne biela, pri použití nulového jasu vznikne čierna). Tento farebný model má

<sup>3</sup>Obrázok prevzatý z <http://fotographie.com/wp-content/uploads/2016/05/compare-dynamic-range.jpg>

svoje rozšírenia. Najznámejšie sú **AdobeRGB** a **ProPhoto**. Rozdielom medzi štandardným RGB modelom a AdobeRGB je väčšie spektrum farieb. ProPhoto obsahuje ešte väčší rozsah farebných odtieňov ako AdobeRGB.

**CMYK** (možné vidieť na obr. 2.3) farebný priestor je model, ktorý je najviac používaný vo farebnej tlači. Je to farebný model tvorený farbami: azurová(**CYAN**), purpurová(**MAGENTA**), žltá(**YELLOW**), čierna(**BLACK**). Čierna je výsledkom spojenia azurovej, purpurovej a žltej. Dôvod prečo je toto farebné spektrum využité v tlači je ten, že papier je biely a výsledkom spojenia týchto farieb je čierna.



Obr. 2.3: Farebné modely RGB a CMYK<sup>4</sup>

## Farebná hĺbka

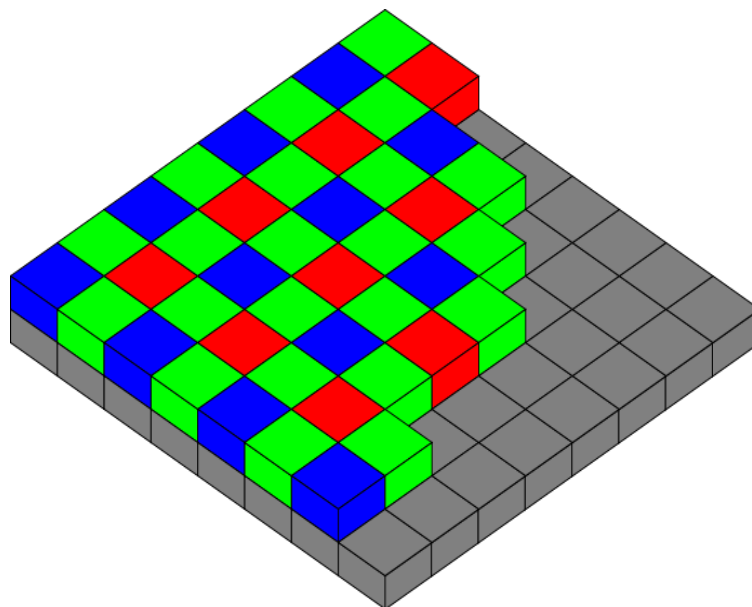
Farebná hĺbka alebo hĺbka pixelu je číslo, ktoré určuje koľko bitov je využitých na určenie farby pixelu. To znamená, čím vyššie množstvo bitov, tým väčšie množstvo farieb je možné použiť.

- 1 bit** - 2 farebné odtiene
- 8 bit** - 256 farebných odtieňov
- 16 bitov** - 65 536 farebných odtieňov
- 24 bitov** - 16 777 215 farebných odtieňov
- 32 bitov** - 4 294 967 296 farebných odtieňov

## Bayerova maska

Dnešné snímače nedokážu na každej bunke zachytiť celý rozsah farebného spektra. Dokážu zachytiť iba intenzitu dopadajúceho svetla. Z tohto dôvodu je potrebné nejakým spôsobom rozdeliť, aká bunka bude zachytávať akú farbu. Na ploche snímača sa nachádza tzv. Bayerov filter alebo Bayerova maska[9] (zobrazená na obr. 2.4). Tento filter určuje na akú farbu bude každý bod citlivý. Keďže snímky ukladáme do RGB(červená, zelená, modrá) farebného priestoru, tak aj vlnové dĺžky farieb, sú rozdelené do tohto spektra. Toto usporiadanie má pravidelnú štruktúru a po zachytení snímky je možné zložiť obraz z týchto 3 základných farieb.

<sup>4</sup>Obrázok prevzatý z <http://www.photoshopbook.net/photoshop-manual/images/teoria/rgb-cmyk.png>



Obr. 2.4: Rozloženie farebnej štruktúry Bayerovej masky<sup>5</sup>

## RAW formát

Všetky alebo takmer všetky zariadenia schopné zachytiť snímku, dnes dokážu pracovať s najbežnejším formátom (JPEG) pre snímky s nízkym dynamickým rozsahom. Či už ide o lacnejšie fotoaparáty alebo kvalitnejšie DSLR, respektíve mirrorless kamery. V dnešnej dobe už aj lacnejšie aparáty dokážu zachytiť veľmi kvalitné snímky. Problém, ktorý nastáva je ten, že tieto aparáty pri ukladaní do formátu JPEG využívajú kompresiu a automatické tónové mapovanie 2.5.2. To má za následok zníženie kvality a takisto dynamického rozsahu snímky.

Drahšie aparáty ponúkajú možnosť uloženia snímok vo formáte RAW. Tento formát je omnoho náročnejší na pamäť, avšak dokáže v sebe zachovať omnoho viac informácií o tom, ako bola snímka zachytená. Avšak najdôležitejšia vec je, že táto snímka ako nám napovedá názov je bez akejkoľvek úpravy alebo kompresie. Tieto všetky detaily dokážu veľmi uľahčiť následnú prácu so snímkom a predovšetkým zachovať snímku v omnoho vyššej kvalite.

## 2.2 História HDR

História[16] tvorby HDR siaha až do 19. storočia. Už v tejto dobe keď vznikali historicky prvé fotky, existoval rovnaký problém ako v dnešnej dobe. Tým problémom bolo, že nie je možné zachytiť plný dynamický rozsah fotky, respektíve nie je možné zachytiť všetky svetlé aj tmavé detaily v jednej fotografii. Ľudia vedeli o tomto probléme tak sa snažili nájsť riešenie. Historicky prvá HDR snímka bola vytvorená Gustavom Le Grayom pred vyše 150 rokmi. Využil techniku kombinovanej tlače, keď nasnímal jednu fotografiu exponovanú na more a druhú fotografiu exponovanú na oblohu. Výsledkom spojenia týchto dvoch fotografií bola snímka, kde vynikli detaily mora aj oblohy s názvom **The Brig** (obr. 2.5).

<sup>5</sup> Obrázok prevzatý z [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg/700px-Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/37/Bayer_pattern_on_sensor.svg/700px-Bayer_pattern_on_sensor.svg.png)



Obr. 2.5: Historicky prvá HDR snímka "The Brig"<sup>6</sup>

V roku 1954 prišiel ďalší významný rok pre HDR. Charles Wyckoff vytvoril prvú trojvrstvovú snímku. Každá snímka mala rôznu senzitivitu, rýchlosť uzávierky a inú expozíciu. Touto kombináciou bola zaznamenaná explózia prvej vodíkovej bomby. Snímka sa stala svetoznáma po zverejnení na jednej z titulke magazínu Life.

Ďalším z mílnikov HDR technológie bol rok 1985. V tomto roku s veľkým pokrokom technológií vznikol aj formát pre uloženie HDR snímky. Tento formát sa nazýva **Radiance RGBE**. Bol vytvorený Gregorym Ward Larsonom a používa sa dodnes. Základom bolo, že farebné kanály sú uložené separovane a následne sa s nimi pracuje. Toto umožňovalo lepšiu prácu s dynamickým rozsahom.

## 2.3 Využitie HDR

HDR snímky sú na pohľad oveľa krajšie a lepšie pôsobiace. Ukazujú viac detailov v tmavých aj svetlých miestach, čo v konečnom dôsledku pôsobí na človeka realnejším dojmom. Aj keď sa kvalita zachytenia a zobrazenia reality pomocou technológií môže javiť ako vysoká, tak rozdiel medzi skutočnou realitou je stále veľmi privysoký. HDR má v dnešnom svete už svoje miesto. Realnejšie zobrazenie skutočnosti oproti LDR snímke má vysoký prínos v nasledujúcich smeroch:

Analýza zhotovenej snímky je oveľa jednoduchšia. HDR snímka poskytuje oveľa väčšie množstvo detailov, to znamená že v technologických odvetviach ktoré sa špecializujú na zbieranie a analyzovanie detailov zo snímky je možné zozbierať viac užitočných dát. HDR

<sup>6</sup>Obrázok prevzatý z [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Gustave\\_Le\\_Gray\\_-\\_Brig\\_upon\\_the\\_Water\\_-\\_Google\\_Art\\_Project.jpg/1280px-Gustave\\_Le\\_Gray\\_-\\_Brig\\_upon\\_the\\_Water\\_-\\_Google\\_Art\\_Project.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Gustave_Le_Gray_-_Brig_upon_the_Water_-_Google_Art_Project.jpg/1280px-Gustave_Le_Gray_-_Brig_upon_the_Water_-_Google_Art_Project.jpg)



snímka umožňuje analyzovať veľké množstvo dát, ktoré by pri LDR snímke nikdy nebolo možné zachytiť. Je to obrovský pokrok pre viaceré oblasti života.

Technológia HDR sa začína využívať vo filmoch, virtuálnej realite a všade, kde je zobrazovaná reálne zachytená scéna.

## 2.4 Vytvorenie HDR snímky

Dnes sa nájdu už aj zariadenia ktoré sú schopné zachytiť fotografie s vysokým dynamickým rozsahom, avšak tieto zariadenia sú príliš drahé a pre bežného človeka nie príliš prívetivé. Ďalšou možnosťou ako vytvoriť takúto snímku je využitie softwaru.

### 2.4.1 Využitie techniky na vytvorenie HDR

Reálny svet obsahuje dynamický rozsah hodnôt od 1 do 2 000 000 v každom farebnom spektre. Štandardné technológie, ako dnešné fotoaparáty, zvládnu zaznamenať iba 8 bitov (256 hodnôt) a to nie je dostatočné. To je jeden z hlavných dôvodov prečo nedokážu zachytiť fotografiu s vysokým dynamickým rozsahom.

Káždopadne, dnes sa už nájdu aparáty, ktoré sú schopné zachytiť snímku s vysokým dynamickým rozlíšením. Rozdiel týchto aparátov je predovšetkým vo zvýšení počtu bitov na kanál. Zvýšenie bitov na kanál, ale nestačí. Ďalším problémom je spôsob, akým oko vníma svetlo. Ľudské oko vníma svetlo s logaritmickou citlivosťou, avšak dnešné fotoaparáty so snímacími čipmi typu CCD/CMOS pracujú s lineárnou citlivosťou. Takže druhým rozdielom u týchto špeciálnych aparátov je zmena čipu. Tento vzniknutý čip sa nazýva HDRC[7] a približuje sa k zaznamenávaniu svetla s logaritmickou citlivosťou.

### Princíp fotoaparátu

Fotoaparát je zariadenie, ktoré dokáže zachytiť obraz realného sveta pomocou svetla odražajúceho sa na svetelný senzor (čip, snímač) a preniesť ho do digitálnej podoby. V nasledujúcej sekcii budú popísané časti fotoaparátu[2].

- **Svetelný senzor** - Tento čip obsahuje svetlocitlivé bunky, ktoré reagujú na svetlo a dokážu tak zmerať farbu a jas dopadajúci na tieto bunky, respektíve pixely. Následne sa tento náboj premení na zhluk jednotiek a núl, ktoré sa zaznamenajú a uložia v podobe snímky. Ide o zmenu analógovej informácie na digitálnu. Momentálne najviac používané typy čipov sú - **CCD** a **CMOS**.
- **Objektív** - Prvok fotoaparátu, ktorým je šošovka alebo sústava šošoviek, ktorá má za účel smerovať svetlo na svetelný čip. Súčasťou objektívu je clona, ktorá určuje množstvo svetla prechádzajúceho cez objektív na snímací čip.
- **Clona** - Je malý otvor v podobe kruhu, ktorý umožňuje svetlu dostať sa na snímací čip. Fotoaparáty dovoľujú mechanicky meniť veľkosť clony a tým ovplyvňovať množstvo svetla dopadajúceho na čip. Označenie a princíp veľkosti clony bol popísaný v sekcii 2.1.
- **Uzávierka** - Prvok, ktorý zabraňuje akémukoľvek svetlu, aby dopadol na snímací čip. V prípade zatlačenia spúšte fotoaparátu sa táto uzávierka otvorí a prepustí tak svetlo na snímací čip. Doba otvorenia uzávierky ovplyvňuje, aké veľké množstvo svetla

dopadne na snímací čip. Podľa toho ako dlho ostane uzávierka otvorená je určený expozičný čas, ktorý bol popísaný v sekcii 2.1.

- **Hľadáčik** - Umožňuje fotografovi sledovať snímanú scénu namiesto displeja. Umožňuje vidieť scénu jasnejšie a detailnejšie. Vzhľadom na typ hľadáča dnes existujú viaceré typy digitálnych fotoaparátov.

**DSLR fotoaparáty** alebo takzvané zrkadlovky fungujú na princípe sklopného zrkadielka, ktoré prevracia reálne snímaný obraz na ďalšie zrkadielko, ktorého odraz vidí fotograf v podobe reálne snímanej scény. Táto mechanická funkcia má za následok róbustnú veľkosť týchto prístrojov. Výhodou pri tejto veľkosti je možnosť využitia väčších snímacích čipov, ktoré dokážu zaznamenať obraz vo väčšom rozlíšení a s menším množstvom šumu.

**Mirrorless fotoaparáty** alebo takzvané bezzrkadlovky. Najväčším rozdielom oproti DSLR aparátom je skutočnosť, že obraz zobrazovaný v hľadáčku nie je premietaný pomocou zrkadielok, ale je spracovaný digitálne a následne premietnutý do elektronického hľadáča. Výhodou týchto fotoaparátov je možnosť vidieť v hľadáčku snímku s úplnou ekvivalenciou k tomu ako bude následne zobrazená na počítači alebo premietacom zariadení. Elektronický hľadáčik umožňuje zobraziť rôzne detaily o práve snímanej scéne ako napríklad histogram jasu. Neprítomnosť mechanických častí v podobe zrkadielok má za následok nižšiu hmotnosť a veľkosť fotoaparátu. Táto skutočnosť môže spôsobiť nutnosť použitia menšieho čipu. Avšak v dnešnej dobe už existujú bezzrkadlovky s čipom, ktorého veľkosť je podobná veľkosti čipu zrkadloviek.

#### 2.4.2 Využitie softwaru na vytvorenie HDR

Ako bolo spomenuté, dnešné bežné digitálne fotoaparáty nedokážu zachytiť plný dynamický rozsah scény. Použitie fotoaparátu s čipom HDRC by zas bolo príliš finančne náročné a nepraktické. Najoptimálnejšie riešenie je vytvorenie HDR snímky (príklad HDR snímky je možné vidieť na obr. 2.6) z viacerých LDR snímok pomocou softwaru. Základom je nasnímanie scény viackrát s rôznou expozíciou, aby sme boli schopní poskladať dané snímky a naplno ukázať detaily. Dôvodom, prečo je nutné zhotoviť viac snímok s rôznou expozíciou, je ten, že senzor dokáže nasnímať snímku iba s obmedzeným dynamickým rozsahom. Tento rozsah nestačí na pokrytie tmavých aj svetlých miest. Z tohto dôvodu je nutné nasnímať snímku s rôznou expozíciou, aby sme dokázali túto sekvenciu snímok spojiť a umelo tak vytvoriť snímku s vyšším dynamickým rozsahom.





Obr. 2.6: Príklad snímky vytvorenej pomocou programu EasyHDR<sup>7</sup>

### Skladanie viacerých LDR snímok

Na skladanie LDR snímok za účelom vzniku HDR snímky sú potrebné vždy minimálne 3 snímky (v skutočnosti stačia 2 snímky). Snímka s nižším exponenčným časom zabezpečí, že vyniknú predovšetkým detaily s vyšším jasom. Naopak pri snímke s nižším exponenčným časom vyniknú detaily s nízkym jasom. Pre veľmi náročné svetelné scény je vhodné použiť viac ako 3 snímky.

Pri fotení je potrebné zabezpečiť statickosť scény, to znamená aby sa objekty na scéne počas fotenia nepohli. V prípade, že by sa nám objekty počas fotografovania hýbali, na snímke môžu vzniknúť rôzne útvary, tzv. duchovia<sup>8</sup>. V takomto prípade je potrebné využiť tzv. deghosting metódy<sup>9</sup>. Statickosť je ďalej možné jednoducho vylepšiť využitím režimu autobracketing (je popísaný v ďalšej časti tejto kapitoly). Je to režim, ktorý zabezpečí nasnímanie snímku s rôznymi parametrami. Pre nás konkrétne to znamená zmenu expozičného času. Ďalej je vhodné fotiť pomocou statívu, aby sme získali dokonale ostré obrázky.

### Zhotovenie snímok

Pre zhotovenie kvalitných LDR snímok, ktoré chceme použiť pre následne zloženie, je potrebné splniť isté podmienky. V prípade nesplnenia týchto podmienok by mohlo pri vzniku HDR snímky dojsť k nežiadúcim efektom 2.8.

- **Statickosť snímanej scény** - pri fotografovaní za účelom tvorby HDR snímky je nutné zabezpečiť statickosť snímanej scény. To znamená, aby sa na scéne nevyskytovali pohybujúce sa objekty ako kráčajúci ľudia, vozidlá a podobne. Výskyt týchto objektov by mohol spôsobiť vznik nežiadúcich efektov ako napríklad duchov 2.8.

<sup>7</sup>Obrázok prevzatý z <https://www.easyhdr.com/examples/mountains/>

<sup>8</sup>duchovia (ghosts) - transparentné objekty, vznikajúce z dôvodu, že objekt má na snímkach rôzne polohy

<sup>9</sup>metódy, ktoré dokážu odstrániť nežiadúce objekty-duchov

- **Použitie statívu** - je priam nemožné zhotoviť viackrát snímku s rovnakou scénou a s rovnakým zarovnaním. Dôvodom je, že pri stlačení spúšte dochádza k pohybu fotoaparátu. Jedným z riešení tohto problému je použitie statívu. Avšak ani samotné použitie statívu nemusí stačiť. Aj mierny pohyb popri stlačení spúšte s využitím statívu môže spôsobiť nezarovnanosť snímok. Nezarovnanosť snímok spôsobuje pri skladaní HDR snímky veľa rôznych problémov. Medzi najčastejšie problémy patrí vznik duchov, šumu poprípade rozmazanosti niektorých hrán. Jednou z možností ako dosiahnuť maximálnu zarovnanosť snímok je popri statíve použiť aj softwarovú metódu. Existuje mnoho programov a implementácií riešenia tohto problému. Pred samotným skladaním snímok sa využije táto metóda, ktorá upraví snímky, aby boli maximálne zarovnané. Implementácia tejto metódy však nie je predmetom tejto práce.

Ďalšou možnosťou ako zabezpečiť statickosť je využitie mobilného telefónu ako ovládača pre fotoaparát. Avšak tu sa stretávame s viacerými problémami. Jedným z nich je, že nie všetky fotoaparáty ponúkajú takúto možnosť. Ďalším problémom je veľakrát kompatibilita fotoaparátu s mobilným zariadením. Bez ohľadu na tieto problémy je táto možnosť dosť nepraktická a veľakrát aj časovo náročná.

- **Využitie autobracketingu** pre tvorbu HDR snímky je nutné, aby boli LDR snímky zhotovené s rôznou expozíciou. Nutnosťou je, aby sa v tejto sekvencii snímok nachádzala minimálne jedna podexponovaná snímka a jedna preexponovaná snímka. Pri väčších rozdieloch týchto expozícií je ideálne zhotoviť viac snímok. Autobracketing alebo AEB[15] je funkcia, ktorú obsahuje už väčšina dnešných digitálnych fotoaparátov. Umožňuje užívateľovi automaticky nastaviť, že pri snímaní scény bude zhotovených viac snímok s rôznou expozíciou. Zvyčajne sa využíva možnosť zachytenia scény trikrát s rôznou expozíciou. Ako príklad si môžeme uviesť, že pri nastavení troj-násobného snímania s rozdielom expozície 2EV budú zhotovené tri snímky s expozíciou -2EV, 0EV, 2EV. Tieto snímky je následne možné použiť pri tvorbe HDR snímky. Každý fotoaparát, ktorý má túto funkciu ju umožňuje použiť rôznym spôsobom. Niektoré fotoaparáty umožňujú nastaviť viac druhov krokov pri zmene expozície. Napríklad 0.3EV, 0.5EV, 0.7EV, 1EV, 2EV a podobne. Ďalším parametrom, ktorý je možné nastaviť je počet zhotovených snímok. Veľa moderných fotoaparátov dokáže zhotoviť až deväť snímok s rôznou expozíciou. Veľkú úlohu zohráva aj nastavený mód fotenia. Snímky je možné zachytiť buď stlačením a podržaním spúšte alebo viac násobným stlačením spúšte. Všetky tieto parametre závisia od konkrétneho modelu fotoaparátu.

## Kompozícia snímok

Ako sme sa dozvedeli vyššie, tak pre vytvorenie HDR snímky z LDR snímok je potrebné poznať ich expozičný čas, clonu a ISO citlivosť. Najvyužívanejšou technikou pre kompozíciu snímok je metóda od Debevec a Malika[8]. Je to metóda, ktorej algoritmus využíva váhové priemerovanie jednotlivých bodov každej snímky. Pre vznik novej snímky využíva viaceré parametre ako je expozičný čas, funkciu odozvy fotoaparátu a váhovú funkciu. Nasledujúci vzorec (2.3) popisuje výpočet novej hodnoty pre každý bod snímky.

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (2.3)$$

Vzorec je možné prepísať do nasledujúceho tvaru (2.4):

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{w(Z_{ij})} \quad (2.4)$$

Vidíme, že každá nová hodnota bodu snímky je ovplyvnená pôvodnými hodnotami bodov. Expozičný čas je  $\Delta t$ .

### Váhova funkcia

Váhová funkcia sa využíva pri výpočte v tom zmysle, že určuje pre každý pixel snímky, do akej miery je tento bod správny a ktorému bodu dá prednosť. To znamená, že váhová funkcia sa snaží vybrať predovšetkým body so správnou expozíciou. Naša konkrétna funkcia od Debevec a Malik dáva najväčšiu výhodu pixelom v strede expozície a pri preexponovaných alebo podexponovaných hodnotách táto váha lineárne klesá. Vzorec (2.5) váhovej funkcie je:

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{for } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{for } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases} \quad (2.5)$$

## 2.5 Zobrazenie HDR snímky

Momentálne sú vo svete najviac rozšírené LCD displeje. Avšak tie majú značné problémy. Najlepšou voľbou ako zobraziť HDR snímku na takomto displeji je využitím tónovacieho mapovania (tone mapping).

### 2.5.1 Zobrazovacie technológie

Problémom LCD displejov je, že jednotlivé kryštály displeja nedokážu úplne vypnúť žiarenie svetla. Z tohto dôvodu nie je možné zobraziť na displeji dokonalú čiernu farbu. Momentálne najnovšia technológia OLED (pre porovnanie obr. 2.7) displejov dokáže úplne vypnúť konkrétnu diódu a tým aj zobraziť dokonalú čiernu farbu[19]. Bohužiaľ tieto displeje sú momentálne stále cenovo drahé. V priebehu niekoľkých rokov je však možné očakávať prudký nárast OLED displejov. Už dnes môžeme v niektorých obchodoch vidieť vychytávky v podobe 4K HDR OLED televízorov.



Obr. 2.7: Rozdiel medzi zobrazením farieb na OLED a LCD displejoch<sup>10</sup>

<sup>10</sup>Obrázok prevzatý z [http://1.bp.blogspot.com/-XkeQDPbN4Z8/VZXSyiPEXI/AAAAAAAAABU8/J1BR2\\_kdP5I/s1600/dp7-color-oled-vs-lcd.jpg](http://1.bp.blogspot.com/-XkeQDPbN4Z8/VZXSyiPEXI/AAAAAAAAABU8/J1BR2_kdP5I/s1600/dp7-color-oled-vs-lcd.jpg)

### 2.5.2 Tónové mapovanie

Dnešné bežne rozvinuté displeje nie sú schopné zobrazit HDR snímku. Tento problém musíme vyriešiť takým spôsobom, že danú HDR snímku, respektíve jej každú farebnú zložku premapujeme naspäť na snímku s nízkym dynamickým rozsahom. Toto mapovanie vykonáme pomocou tzv. tónovacieho operátora. Tieto operátory rozdeľujeme do dvoch skupín na globálne a lokálne [6].

#### Globálne operátory

Podstatou je zredukovanie dynamického rozsahu každého pixelu bez toho, aby sme stratili všetky svetelné detaily, ktoré sme získali pri skladaní LDR snímok. Globálne operátory aplikujú funkciu na každý pixel zvlášť. Tým pádom nemusia byť dosiahnuté také dokonalé výsledky. Medzi najznámejšie operátory patria:

- Lineárny operátor
- Logaritmický operátor
- Exponencionálny operátor
- Tumblin-Rushmeierov operátor
- Reinhardov operátor
- Dragov operátor

#### Lineárny operátor

Lineárny operátor je najjednoduchší operátor. Jednoduchá implementácia dokazuje, že tento operátor nedosahuje príliš dobré výsledky. Princíp operátora spočíva v tom, že sa stanoví koeficient podľa maximálnej svetelnosti celého HDR obrazu a všetky pixely HDR snímky sú vynásobené daným koeficientom. Vzhľadom na tento fakt, že ide o prosté zmenenie svetelnosti každého pixelu rovnakým koeficientom, tak výsledok nebude príliš kvalitný.

#### Logaritmický operátor

Logaritmický operátor je zložitejší ako lineárny, avšak stále nedosahuje kvalitné výsledky. Využíva sa logaritmická funkcia s 2 voliteľnými parametrami.

#### Exponencionálny operátor

Exponencionálny operátor využíva pre mapovanie každého pixelu exponencionálnu funkciu s 2 voliteľnými parametrami.

Nasledujúce dva operátory budú popísané detailnejšie, keďže sú súčasťou implementácie požadovaného programu pre túto prácu.

#### Reinhardov operátor

Reinhardov operátor patrí medzi zložitejšie operátory. Jeho využitie je častejšie, lebo dosahuje kvalitné výsledky. Tento operátor je spracovaný v článku *Photographic Tone Reproduction for Digital Images*[14].

Základným krokom je výpočet tzv. kľúča scény, ktorého hodnota vyjadruje celkovú svetelnosť scény. Ak ide o tmavšiu scénu hodnota bude nižšia a naopak ak ide o svetlejšiu scénu, hodnota kľúča bude vyššia. Výpočet tohto kľúča získame pomocou logaritmickeho priemeru všetkých bodov danej snímky pomocou vzorca (2.6):

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left( \sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (2.6)$$

Kde  $L_w(x,y)$  určuje svetelnosť bodu (x,y). N je počet bodov obrázku a  $\delta$  je malá hodnota, aby nedochádzalo k nedefinovaným výpočtom v prípade, že ide o čierny bod. V prípade normálnej hodnoty kľúča by sme chceli túto scénu mapovať do stredne šedej hodnoty zobrazenej snímky alebo na hodnotu 0.18 v prípade intervalu 0 až 1. Toto znázorňuje nasledujúca rovnica (2.7):

$$L(x,y) = \frac{a}{\bar{L}_w} L_w(x,y) \quad (2.7)$$

Hodnota 'a' uvádza na aký rozsah bude jas namapovaný. Doporučuje sa hodnota  $a = 0.18$  pre normálnu hodnotu kľúča. Pre nižšiu respektíve vyššiu hodnotu kľúča sa môže rozsah mapovania jasu meniť a v takom prípade sa odporúča hodnota  $a$  od 0.18 po 0.72. Problém rovnice (2.7) nastáva v svetlých častiach snímky. Pôvodne fotoaparáty riešili tento problém kompresiou nízkych a vysokých hodnôt svetelnosti, avšak moderné zariadenia túto kompresiu nepoužívajú. Problém sa dá riešiť nasledujúcou rovnicou (2.8):

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y)}{1 + L(x,y)} \quad (2.8)$$

Kde body s vysokým jasom nadobúdajú približne inverznú hodnotu a body s nízkym jasom sa nemenia. Rovnicu je možné upraviť na nasledujúci tvar (2.9):

$$L_d(x,y) = \frac{L(x,y) \left( 1 + \frac{L(x,y)}{L_{white}^2} \right)}{1 + L(x,y)} \quad (2.9)$$

Kde za  $L_{white}$  sa dosadzuje maximálny jas fotografie, čo zabezpečí, že nebudú vznikať preexponované časti na snímke.

## Dragov operátor

Dragov operátor sa takisto radí medzi úspešnejšie operátory. Spracovanie tohto operátora sa nachádza v článku *Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes* [10]. Princíp vychádza z logaritmickeho operátora. Zvolený základ logaritmu vo veľkej miere ovplyvňuje výslednú snímku. Pri základe, ktorý je menší ako 2 sa hodnoty ostro zvyšujú a pri základe väčšom ako 10 snímka stráca kontrast na tmavých miestach. Dragov operátor umožňuje meniť základ logaritmu base (2.10).

$$\log_{base}(x) = \frac{\log(x)}{\log(base)} \quad (2.10)$$

Pre hladký priebeh interpolácie využívame Perlin a Hoffertovú bias funkciu (2.11):

$$bias_b(t) = t^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \quad (2.11)$$

Pre každý bod sa vyjadří hodnota  $L_d$  na základe nasledujúcej rovnice (2.12):

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}}\right) \cdot 8\right)} \quad (2.12)$$

Hodnota  $L_d$  je hodnota aktuálneho pixelu.  $L_{dmax}$  sa používa pre adaptáciu na displej ako maximálny použiteľný jas. Používa sa hodnota  $L_{dmax} = 100 \text{ cd/m}^2$  ako bežná hodnota pre CRT displeje. Hodnota  $L_w$  je globálna jasová hodnota a  $L_{wmax}$  je najvyššia luminancia snímky. Obidve tieto hodnoty musia byť normalizované pomocou koeficientu  $L_{wa}$ . Ide o logaritmus priemernej hodnoty jasu HDR snímky. Tento výsledok je následne normalizovaný pomocou rovnice (2.13).

$$L_{wa} = \frac{L_{wa}}{(1 + b - 0.85)^5} \quad (2.13)$$

Parameter  $b$  je zodpovedný za kompresiu vysokých hodnôt a viditeľnosti detailov v tmavých miestach. Hodnota môže byť v rozmedzí 0 až 1.0, avšak hodnoty medzi 0.7 až 0.9 sa používajú pre dosiahnutie najlepších výsledkov.

## Lokálne operátory

Lokálne operátory mapujú jednotlivé pixely aj na základe intenzity okolitých pixelov. Dosahujú svoje výsledky tam, kde už globálne operátory nestačia. Avšak takisto majú svoje nevýhody. Najväčšou nevýhodou lokálnych operátorov je občasný vznik halo<sup>11</sup> efektu na hranách.

## Frekvenčné operátory

Frekvenčné operátory sa snažia zachovať hrany a lokálny kontrast. Základom pre tieto operátory je frekvencia. Časti vysokých a nízkych frekvencií obrazu sú oddelené. Tieto operátory sú aplikované iba pri nízkych frekvenciách. Pri vysokých frekvenciách sa časti snímky nemenia.

## Segmentačné operátory

Pri segmentačných operátoroch je snímka rozdelená na rôzne oblasti, takzvané segmenty. Pri tejto metóde sa využije jeden z globálnych operátorov na namapovanie konkrétneho segmentu. Segmenty sú následne zložené do výslednej snímky.

## 2.6 Formát HDR snímok

Jednotlivé HDR snímky nie je vhodné reprezentovať, tak ako klasické snímky. Dôvodom je, že pri klasických snímkoch je každá farba reprezentovaná 8bitovou hĺbkou (256 hodnôt) a to pre reprezentáciu HDR snímku nestačí. Pre účel reprezentácie farieb v HDR snímku sa najviac hodí aritmetika s plávajúcou desatinnou čiarkou. Nasleduje výpis vybraných formátov pre reprezentáciu HDR obrazu[13][11].

- **LogLuv formát**

---

<sup>11</sup>Pri silnejšom zaostrení môže v okolí tmavého objektu vzniknúť svetlý rušivý obrys a naopak.



LogLuv formát je zakódovaný logaritmicky. Každý pixel je reprezentovaný pomocou 32 bitov, kde 16 bitov využíva na zakódovanie jasú, ktorý je upravovaný logaritmom so základom 2 a zvyšných 16 bitov nesie informácie o farebných kanáloch. Toto rozdelenie na dve časti je najvyššou výhodou oproti RGBE formátu. Nevýhodou oproti RGBE je jeho veľkosť, keďže neexistuje možnosť komprimácie tohto formátu, respektíve je veľmi zložitá, keďže potrebuje ďalšie bity na zakódovanie mantisy a exponentu. Tento formát je súčasťou knižnice TIFF.

- **RGBE Radiance formát**

RGBE formát inak nazývaný aj ako Radiance HDR ukladá súbory s príponou .hdr, .pic. Tento formát našiel svoje uplatnenie a je pomerne využívaný. Každý pixel obrazu je zakódovaný pomocou 32 bitov. Farebné kanály (RGB) sú uložené na veľkosti 24 bitov, 8 bitov na kanál. Zvyšných 8 bitov je určených na exponent všetkých farebných kanálov. Formát je schopný slušnej kompresie, vďaka čomu HDR snímky zakódované v tomto formáte dosahujú približne hodnotu LDR snímok v RGB kódovaní.

- **OpenEXR formát**

Momentálne najpopulárnejší formát (prípona .exr) pre archiváciu HDR snímok. Dovoľuje použiť viacero kódovaní. Je možné využiť napríklad 32 bitové kódovanie na kanál s alebo bez aritmetiky pohyblivej desatinnej čiarky. Ďalšie a častejšie používané je 16 bitové alebo 24 bitové kódovanie na kanál pomocou celých čísel. Toto kódovanie oproti 32 bitovému ma menší dynamický rozsah, ale pre praktické účely je to dostatočné. Jednotlivé bity sú rozdelené do troch zložiek: znamienkový bit, exponent a mantisa. Ako napovedá názov, ide o open source formát, ktorý je stále vyvíjaný.

## 2.7 Dostupné programy na skladanie HDR obrazu

V súčasnosti je dostupných viacero aplikácií, ktoré poskytujú možnosti ako vytvárať HDR snímky zo série LDR snímok. Jednotlivé programy ponúkajú možnosti výberu tónovacieho operátora, či možnosť výberu formátu uloženia HDR snímky. Medzi najznámejšie aplikácie patria[4]:

- **Easy HDR**- Je jeden zo starších programov na tvorbu HDR obsahu. Je tu od roku 2006. Jeho dlhá história má za následok, že je momentálne jeden z najlepších a najpoužívanejších programov na spracovanie HDR snímky. Užívateľské rozhranie je veľmi prívetivé a jednoduché na ovládanie. Užívatelia programu Adobe Lightroom uvítajú možnosť priameho exportu do EasyHDR.
- **Photomatix Pro** - Dlhú dobu viedol v rebríčku najlepších softwarov na úpravu HDR. V dnešnej dobe už mierne zaostáva za vyššie spomenutým EasyHDR. Má možnosť využiť 4 tónové operátory, ktorých nastavenia dávajú užívateľovi širokú možnosť úpravy HDR snímky.
- **Aurora HDR** - Aurora HDR (užívateľské rozhranie je možné vidieť na obr. 2.8) so svojou verziou 2018 má mnoho možností a funkcií na spracovanie HDR snímky. Vie ponúknuť veľmi naturálny a nádherný vzhľad. Vzhľadom na to, že je to pomerne nový program s rýchlym vývojom, má v sebe vysoký potenciál.
- **Luminance HDR (opensource)** - Tento opensource program je jednoduchý na inštaláciu, prostredie nie je až tak prívetivé ako niektoré platené programy. Vzhľadom

na to, že je opensource, tak ponúka veľmi kvalitné výsledky s obstojnou rýchlosťou spracovania.



Obr. 2.8: Jeden z najpoužívanejších programov Aurora HDR<sup>12</sup>

## 2.8 Nežiadúce efekty

Pri skladaní snímok s vysokým dynamickým rozsahom existuje stále isté množstvo nežiadúcich efektov. Nežiadúce efekty môžu vzniknúť z viacerých dôvodov.

### Duchovia (Ghosts)

Jeden z najväčších problémov pri tvorbe snímok s vysokým dynamickým rozsahom je vznik nežiadúcich objektov. Tieto objekty sa zvyknú nazývať duchovia. Ide o akési rozmazanie alebo siluetu, ktorá vzniká pri fotografovaní pohybujúcich sa objektov. Ak fotíme scénu, ktorá je statická a nie je možnosť, aby sa niektorý zo snímaných objektov pohol, tak prakticky neexistuje šanca, aby vznikol takýto objekt. Ak fotíme scénu, ktorá takéto objekty obsahuje, tak je táto pravdepodobnosť veľmi vysoká. Týmito objektami sú predovšetkým ľudia, zvieratá, poprípadе vozidlá alebo akýkoľvek pohybujúci sa predmet.

Momentálne existuje veľa techník a spôsobov ako odstrániť takto vzniknuté objekty. Konkrétne sa nazýva **deghosting**. Vo veľkej miere sa jej venuje veľa výskumov a vzniklo už aj množstvo programov na čiastočne odstránenie tohto problému. Avšak stále je to problém, ktorý nie je dokonale vyriešený.

<sup>12</sup>Obrázok prevzatý z <https://s3.amazonaws.com/captainkimo/wp-content/uploads/2016/02/01060046/Aurora-HDR-Software-Screen-Shot-Review.jpg>



## Nezarovnanosť snímkov

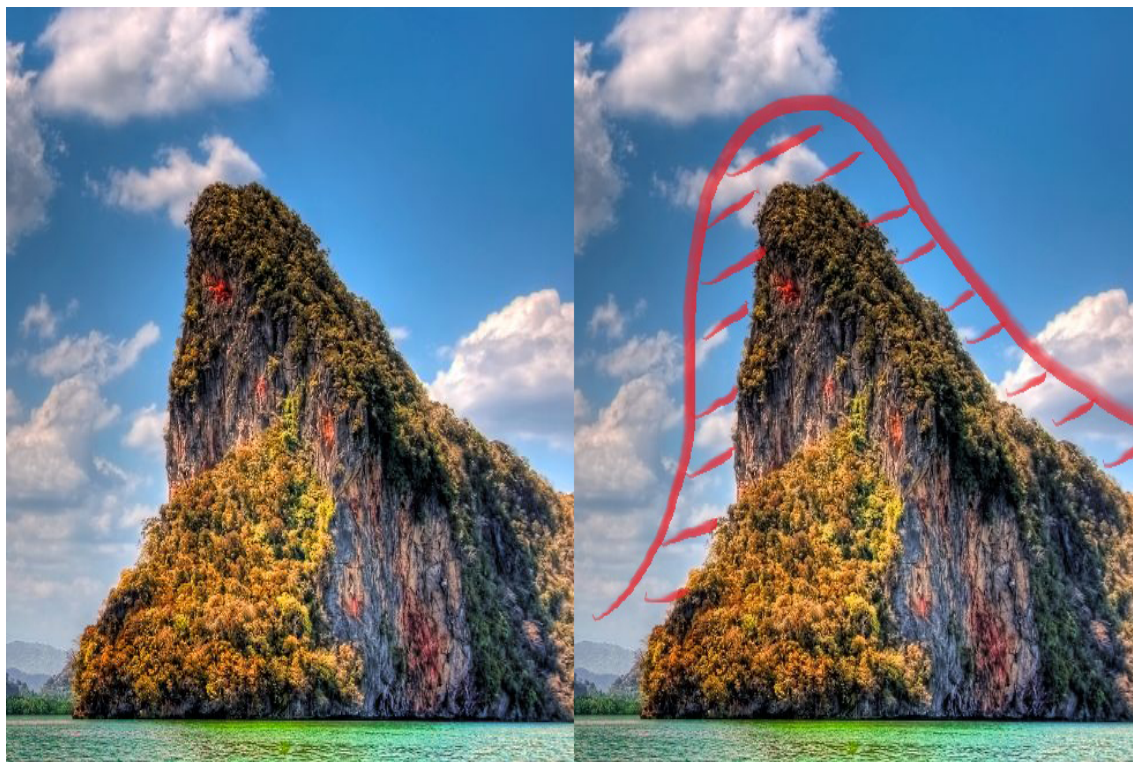
Jedným z veľkých problémov pri skladaní HDR snímky, je ich nezarovnanosť. Vzniká ako dôsledok rôznych pohybov fotoaparátu pri snímaní. Tento jav dokáže pokaziť pekný dojem z výslednej snímky. Riešením problému je použitie softwaru na zarovnanie snímok pred samotným skladaním snímok.

## Šum

Je jeden z obrazových artefaktov, ktoré veľakrát vznikajú už pri zachytení snímky. Avšak v našom prípade je viac vyskytujúci sa v prípade tónového mapovania. Jeden z dôvodov je, že pri mapovaní a po zvýšení kontrastu snímky s nízkym kontrastom sa popri tomto efekte vyskytol aj šum, ktorý sa na snímke predtým nenachádzal.

## Halo efekt

Ďalším z nežiadúcich efektov, ktoré môžu nastať pri fotografovaní je vznik tzv. halo efektu. Tento efekt vzniká pri snímkach, ktoré obsahujú miesta, kde sa stretávajú body s vysokým kontrastom. Znamená to, že rozdiel svetelnosti susedných bodov je veľmi vysoký. Ako príklad môže poslúžiť fotografovanie nejakého tmavého objektu, ktorý sa nachádza v popredí a za ním je obloha. Okolie objektu bude tvoriť akási biela silueta, ktorá môže vytvárať skreslený dojem vo veľkosti objektu. Najčastejší výskyt tohto efektu je pri využití lokálnych tónovacích operátorov, keďže tieto operátory pracujú aj s okolitými pixelmi práve počítaného bodu. To znamená, že pri ostrých prechodoch hrán môže nastať tento efekt. Príklad možno vidieť na obrázku 2.9. Na odstránenie tohto nežiadúceho efektu existuje už mnoho programov, ktoré možno využiť pri úprave.



Obr. 2.9: Na obrázku je možno vidieť bielu siluetu v okolí skaly, ktorá v skutočnosti neexistuje.<sup>14</sup>

## 2.9 HDR Video

V dnešnej dobe existujú kamery, ktoré dokážu zachytiť aj HDR video[17]. Základom je, že pri zachytení obrazu vyprodukuje dvojnásobný počet snímok (jedna snímka s nižším dynamickým rozsahom a druhá snímka s vyšším dynamickým rozsahom), to znamená, že je následne z týchto zachytených snímok s rôznou expozíciou možné vytvoriť HDR obraz. Momentálne najväčšie obmedzenie sa nachádza v zobrazení tohto videa.

Rozdiel medzi HDR snímkom a videom je ten, že pri HDR snímkach mapujeme vysoký dynamický rozsah snímky do nízkeho dynamického rozsahu zobraziteľného na bežných displejoch. Pri videu nemáme vysoký dynamický rozsah týchto snímok na nízky, ale nechávame ich vo vysokom rozsahu. Ide o zachovanie dynamického rozsahu a zobrazenie na najmodernejších displejoch, ktoré sú schopné zobraziť tento vysoký dynamický rozsah.

Ako bolo spomenuté v kapitole 2.1, dnešné technológie najčastejšie využívajú farebné spektrum RGB a zobrazenie jedného farebného kanálu na 8 bitov. To znamená 256 rôznych farieb pre 1 kanál, čo je pri 3 farebných kanáloch 16.78 miliónov farieb. Toto zobrazenie farieb je pre ľudské oko dostačujúce a sa nazýva aj **True Color**. Dnešný používaný formát zobrazenia videa sa nazýva **SDR**(Standard Dynamic Range).

Pri zobrazení HDR videa toto zobrazenie farieb nie je dostačujúce. Najväčším problémom je zobrazenie rozdielov medzi jasom farby.

<sup>14</sup>Obrázok prevzatý z <http://farbspiel-photo.com/wp-content/uploads/2010/08/image-with-halos-03.jpg>

Momentálne medzi najpopulárnejšie formáty, ktoré riešia tento problém patrí HDR10 a Dolby Vision.

Nový formát **HDR10** ho rieši zvýšením rozsahu farebného kanálu na 10 bitov, kde dostaneme 1024 možností zobrazenia jedného farebného kanálu. Toto rozšírenie znamená zobrazenie viac ako 1 bilióna farieb. Pri formáte **Dolby Vision** je to až dokonca 12bitov farieb na farebný kanál. Toto množstvo farieb stačí na zobrazenie 0 až 10000 nitov jasů<sup>15</sup>.

Displeje, ktoré dokážu zobrazit takéto množstvo farieb nadobúdajú v dnešnej dobe na vysokej popularite a sú označované ako HDR, avšak stále sú pre bežného človeka príliš cenovo drahé.

---

<sup>15</sup>Fyzikálna jednotka jasů.

## Kapitola 3

# Špecifikácia zadania

Všetky potrebné informácie k pochopeniu problematiky HDR boli uvedené v predchádzajúcej kapitole 2.1. V tejto kapitole bude uvedený cieľ a spôsob ako riešiť daný problém nízkeho dynamického rozsahu.

Cieľom práce je vytvoriť program s grafickým užívateľským rozhraním, ktorý bude zo série snímok s nízkym dynamickým rozsahom vytvárať snímku s vysokým dynamickým rozsahom.

### Stanovenie cieľov

Program sa bude skladať z viacerých častí. Bude zahŕňať vstupno-výstupné operácie, vytvorenie snímky s vysokým dynamickým rozsahom a tónové mapovanie.

Vstupom bude séria LDR snímok. Zo zadanej sekvencie LDR snímok program musí zvládnuť vytvoriť HDR snímku. Následne existujú dve možnosti. Prvou z nich je uložiť snímku v HDR formáte a tým je práca s ňou ukončená. Druhou možnosťou je využiť jeden z globálnych operátorov a pomocou tónovacieho mapovania previesť dynamický rozsah HDR snímky na LDR snímku zobraziteľnú na bežných displejoch. Užívateľ bude mať možnosť voľby medzi jednotlivými operátormi a takisto možnosť voľby parametrov vzhľadom na použitý operátor. Na nasledujúcom obrázku (obr. 3.1) je možné vidieť návrh programu.



Obr. 3.1: Návrh funkcionality programu<sup>1</sup>

### Vstup programu

Ako vstup je nutné načítať minimálne 3 LDR snímky vo formáte JPEG. Keďže tento formát je dnes najpoužívanější, tak som sa rozhodol práve preň. Ďalšou možnosťou vstupu prog-

<sup>1</sup>Obrázok vytvorený pomocou <https://www.draw.io/m>

ramu bude vloženie HDR snímky, ktorú bude možné následne namapovať podľa zvoleného operátora.

## Skladanie snímok

Pri vložení série LDR snímok bude nasledovať skladanie obrazu, ktorého výsledkom bude HDR snímka. Pre skladanie bude využitý algoritmus od Debeveca a Malika 2.4. Pri tomto algoritme je nutné určiť váhu zvlášť pre každý farebný kanál jednotlivých pixelov snímok. Váha bude k farebným kanálom, respektíve pixelom priradená na základe váhovej funkcie, ktorá bude dopredu vytvorená. Využitá váhová funkcia je vytvorená pánmi Debevecom a Malikom. Po dokončení procesu skladania snímok bude užívateľovi umožnené uložiť HDR snímku v Radiance RGBE formáte, respektíve ako LDR snímku na základe zvoleného tónovacieho operátora v JPEG formáte.

## Tónové mapovanie

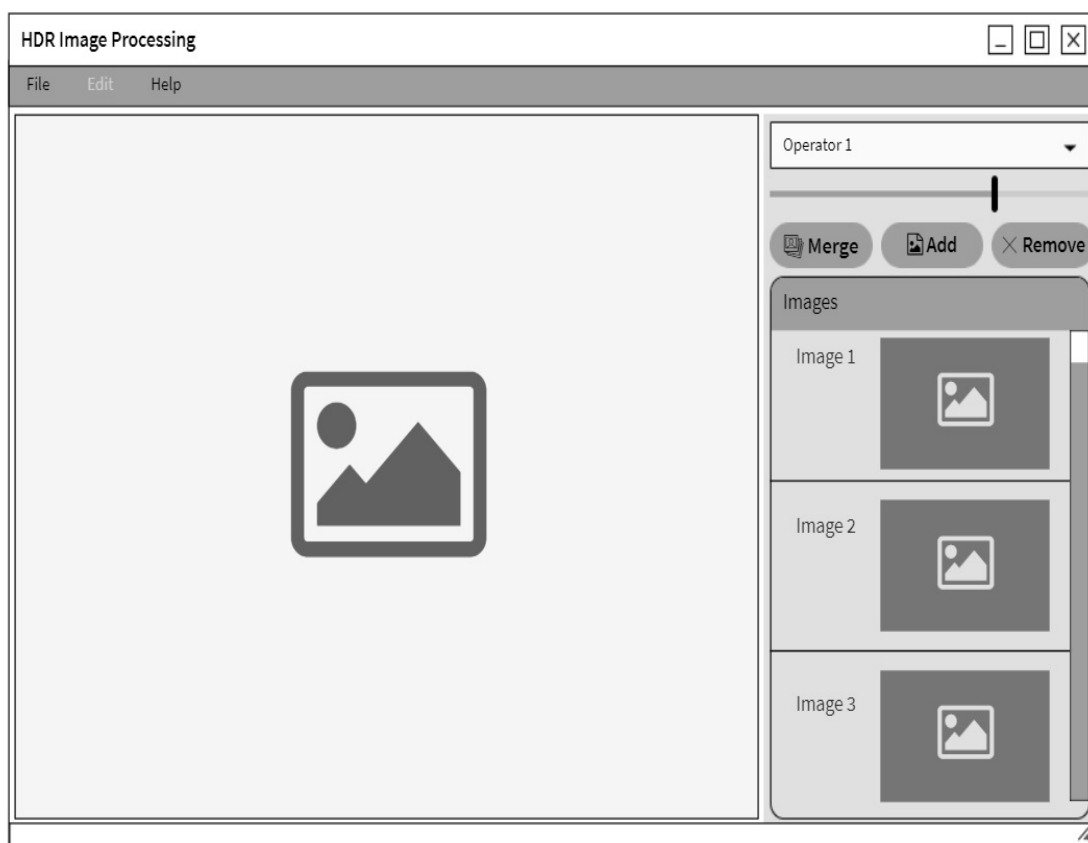
Tónové mapovanie bude možné vykonať na základe dvoch operátorov. Prvým bude Reinhardov globálny operátor, ktorý dosahuje výborné výsledky v tejto oblasti. Druhou možnosťou bude namapovať snímku pomocou Dragovho operátora. Pri prvej možnosti bude mať užívateľ možnosť voľby operátora 'a', ktorý určuje kľúčovú hodnotu, na aký jas bude snímka namapovaná. Pri druhej možnosti (Dragov operátor) bude pre užívateľa možnosť voľby parametru 'b'. Tento parameter určuje kompresiu vysokých hodnôt a viditeľnosti detailov v tmavých miestach.

## Návrh programu

Návrh grafického užívateľského rozhrania (obr. 3.2) som sa snažil vytvoriť tak, aby bol pre užívateľa čo najjednoduchší a najprehľadnejší. V praxi to znamená jedno veľké okno bez nutnosti prepínania medzi rôznymi oknami a položkami a okamžitý prístup k všetkým funkciám programu. Predpokladom je, aby všetky funkcie boli hneď vedľa hlavného okna v podobe tlačidiel. Takéto rozloženie by malo zabezpečiť jednoduchosť použitia tejto aplikácie bez ohľadu na vek používateľa.

Základom by mal byť veľký priestor, kde bude zobrazený náhľad namapovanej fotografie po využití globálne tónového operátora. Druhú časť by mali tvoriť ovládacie prvky aplikácie spoločne s malými ikonami, takzvanými miniatúrami snímok, ktoré sa užívateľ rozhodol použiť pre skladanie.

Medzi základne prvky pre prácu budú slúžiť tlačidlá na pridanie, odstránenie snímok z listu, či už sa jedná o LDR alebo HDR formát snímok. Tento list bude tvorený snímkami, ktoré budú použité na zhotovenie HDR snímky alebo jednou HDR snímkou, ktorú sme sa rozhodli namapovať. Pôjde o interaktívny list, do ktorého bude možné, v prípade LDR snímok, snímky dopĺňať aj odoberať z neho. Ďalším tlačidlom bude zahájenie procesu skladania snímok. Parametre podľa vybraného operátora budú zvolené na základe spinboxu, respektíve posuvného merítka. Tieto dva prvky budú navzájom prepojené a budú medzi sebou komunikovať, aby si užívateľ zvolil veľkosť parametra cestou, ktorá je pre neho najpohodľnejšia a najjednoduchšia.



Obr. 3.2: Návrh grafického užívateľského rozhrania programu

## Kapitola 4

# Implementácia

V tejto kapitole sú popísané nástroje využité na tvorbu programu, programovací jazyk, knižnice, frameworky. Ďalšiu časť tvorí popis grafického užívateľského rozhrania. Záverečnú časť tvorí rozdelenie a implementácia jednotlivých častí programu s pohľadom na funkcionality.

### 4.1 Využité nástroje

Pre tvorbu tohto programu som sa rozhodol využiť objektový jazyk C++. Tento jazyk bol zvolený predovšetkým pre jeho jednoduchú spoluprácu s množstvom knižníc a frameworkov.

**QT** - Pre vývoj bude využité prostredie QT<sup>1</sup> verzie 5.10.1 spoločne s QT Creator 4.5.2. Toto prostredie je veľmi vhodné pri tvorbe programu, ktorý vyžaduje grafické užívateľské rozhranie. Momentálne ide o jeden z najpopulárnejších frameworkov pre tvorbu programov s využitím grafického rozhrania. Framework je určený predovšetkým pre jazyk C++ a to bol aj hlavný dôvod výberu tohto jazyka spoločne s frameworkom. QT ponúka svoje knižnice aj pre ďalšie jazyky ako Python, Ruby a podobne. Avšak využitie s týmito jazykmi nie je také populárne ako pri C++.

**QT Designer** - Pre tvorbu grafického užívateľského rozhrania bude využitý QT Designer, ktorý je súčasťou QT. Tento dizajnér zjednodušuje tvorbu grafického rozhrania, keďže dokáže generovať kód bez nutnosti manuálneho písania. V prípade programov, kde ide predovšetkým o funkcionality a nie o dokonalú umeleckú prácu je využitie tohto spojenia veľmi užitočné. Uľahčuje to množstvo práce a takisto času. QT aj v spojení s dizajnérom má svoje využitie vo veľmi veľkom množstve priemyselných odvetví. Za spomenutie stojí tvorba digitálnych tachometrov pre rôzne automobily práve pomocou tohto frameworku.

**OpenCV** - Samotný jazyk C++ nám však nebude stačiť k tvorbe tohto programu. K tvorbe budú ďalej využité rôzne knižnice, bez ktorých by bola tvorba tohto programu veľmi zložitá. Prvou z nich je veľmi populárna knižnica umožňujúca jednoduchú prácu s počítačovým videním, grafikou a rôznymi matematickými štruktúrami. Konkrétne ide o knižnicu OpenCV 3.2.0.<sup>2</sup> Táto knižnica umožňuje rýchlo a pohodlne pracovať s rastrovou grafikou. Ako napovedá samotný názov, ide o voľne šíriteľnú knižnicu. Knižnica bola pôvodne vytvorená spoločnosťou Intel pre rozšírenie iniciatívy práce procesorových (CPU) aplikácií. Išlo o súčasť projektu zameraného na prácu s obrazom v reálnom čase a spracovaním 3D obrazu. Výhodou voľného šírenia tejto knižnice je jej aktuálnosť. Knižnica sa neustále rozširuje a vo svojom obore je momentálne najpoužívanější. Knižnica je napísaná

---

<sup>1</sup><https://www.qt.io/>

<sup>2</sup><https://opencv.org/>



predovšetkým v jazyku C++ , avšak stále obsahuje veľa časti Čkovského rozhrania. Táto knižnica ponúka takisto mnoho rozšírení aj pre iné jazyky ako C++. Predovšetkým ide o Python, Java, Matlab a podobne. Dôvodom rozšírenia na iné jazyky je snaha o získanie si väčšieho množstva programátorov. Od roku 2010 sa knižnica začala špecializovať aj na hardverovú akceleráciu založenú na platforme CUDA. Knižnica má obrovskú podporu množstva najpoužívanejších operačných systémov (Windows, Linux, MacOS, FreeBSD a podobne). V tomto programe bude knižnica využitá predovšetkým na prácu s maticami a jej obrazovými bodmi. Uľahčuje prístup k farebným kanálom daného snímku a jednoduchú prácu s nimi.

**RGBE** - Kedže uloženie HDR snímky si vyžaduje špeciálny formát, ktorý podporuje uloženie dát vo formáte s veľkosťou 32bitov na pixel, je nutné využiť knižnicu podporujúcu prácu s týmto formátom - Radiance RGBE(.hdr). Knižnica ktorá to umožňuje sa nazýva RGBE<sup>3</sup> a jej autorom je Gregory Ward, pričom bola následne modifikovaná Bruceom Walterom. Táto knižnica umožňuje jednoduché uloženie HDR snímky vo formáte .hdr. Práca s ňou je veľmi jednoduchá pomocou zopár vytvorených funkcií. Ponúka zvlášť možnosť zápisu hlavičky pomocou funkcie **RGBE\_WriteHeader()** a takisto pixelov snímky priamo z matice pomocou funkcie **RGBE\_WritePixels()**. Knižnica bola využitá aj pri načítaní snímky v HDR formáte. K načítaniu hlavičky bola využitá funkcia **RGBE\_ReadHeader()** a k načítaniu dát snímky funkcia **RGBE\_ReadPixels\_RLE()**.

**TinyEXIF** - Pre tvorbu HDR snímky je potrebné poznať expozičný čas sekvencie LDR snímok. Tieto informácie sú uložené v metadátoch snímky. Ide informácie, akým spôsobom a s akými detailami bola snímka zachytená. Pre extrahovanie expozičného času JPEG snímok som sa rozhodol využiť knižnicu TinyEXIF<sup>4</sup>. Nakoľko si knižnica vyžaduje spoluprácu s knižnicou **TinyXML2**<sup>5</sup>, bolo nutné použiť aj túto knižnicu.

## 4.2 Grafické užívateľské rozhranie

Pre zjednodušenie práce pre užívateľa bolo nutné vytvoriť prívetivé grafické užívateľské rozhranie (obr. 4.1, obr. 4.2), ktoré bude intuitívne a zvládne ho aj človek s minimálnym množstvom skúseností. Užívateľské rozhranie som sa rozhodol vytvoriť vo frameworku pre tvorbu užívateľského rozhrania QT. QT umožňuje manuálne písanie kódu a vyvolať tak grafické prvky alebo využitie QT Designeru, ktorý automaticky generuje časti kódu a uľahčuje tak prácu programátora, aj keď v istých prípadoch to môže byť na škodu, keďže programátor stráca čiastočne prehľad o častiach kódu. Na výber bola možnosť využiť **QWidgety** alebo takzvaný **QT Quick**, ktorý je kombináciou jazykov C++ a QML. Konkrétne som sa rozhodol využiť QWidgety v spolupráci s QT Designerom.

Grafické užívateľské rozhranie je podobné bežným programom na úpravu HDR snímok. Pri tvorbe dizajnu som sa riadil podľa predpripraveného návrhu. Hlavné okno je instanciou triedy **QMainWindow** a je rozdelené na dve časti.

Ľavá časť obsahuje priestor pre zobrazenie namapovanej fotky. Ide o takzvaný **QLabel**, kde užívateľ po zložení fotiek a následnom tonemappingu môže vidieť reálny náhľad fotografie.

Pravú časť tvoria ovládacie prvky na pridanie, odstránenie a zloženie fotografií. Tieto prvky sú tvorené pomocou tlačidiel, konkrétne **QPushButton**. Takisto sa tu nachádza widget **QComboBox**, ktorý ponúka možnosť výberu operátora pre tonemapping. Zvolené operátory (Reinhard, Drago) obsahujú parameter (a respektíve b), ktorý si užívateľ volí sám

<sup>3</sup><http://www.graphics.cornell.edu/~bjw/rgbe.html>

<sup>4</sup><https://github.com/cdcseacave/TinyEXIF>

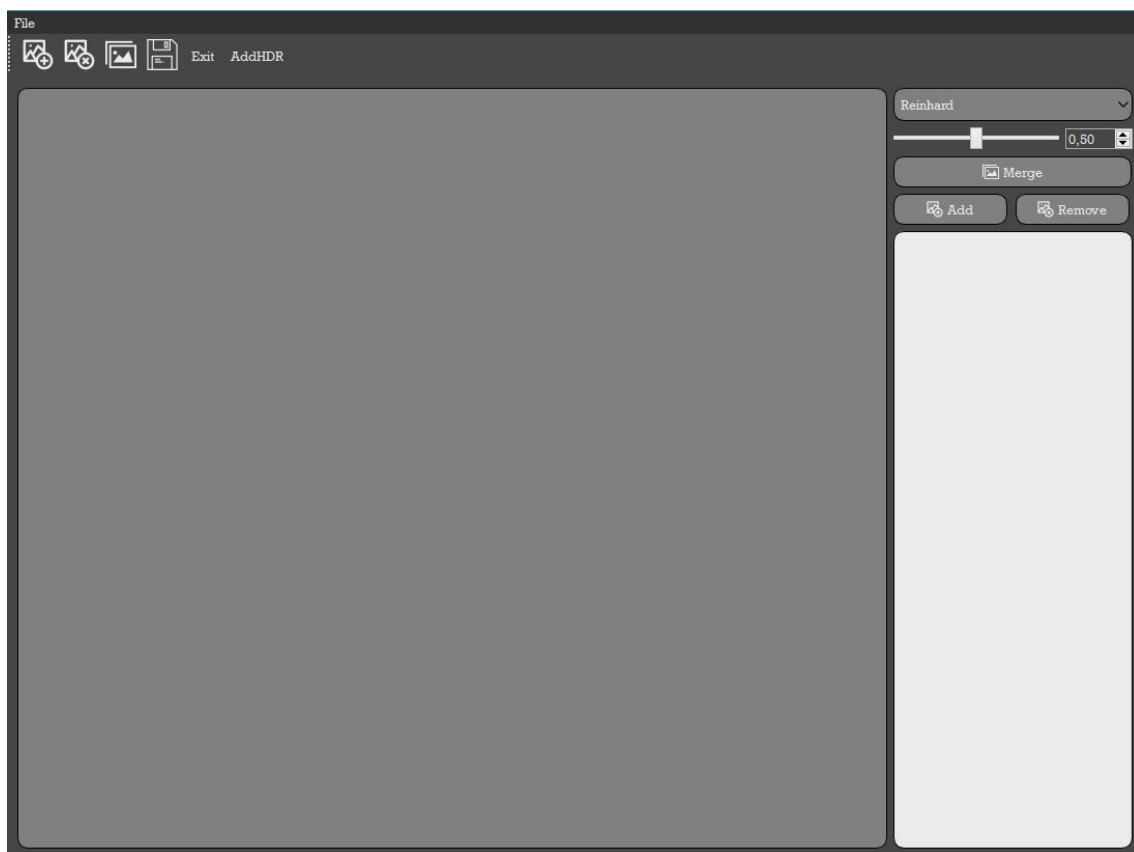
<sup>5</sup><https://github.com/leethomason/tinyxml2>



podľa svojho subjektívneho postoja. Možnosť voľby tohto parametru je dovolená pomocou **QDoubleSpinBoxu** a **QSlidera**. Tieto dva grafické užívateľské prvky sú medzi sebou prepojené a sú na sebe závislé. Užívateľ tak môže napríklad zmeniť hodnotu podľa posuvného merítka - slidera a táto zmena sa premieta na zmene číselnej hodnoty v spinboxe. Spinbox je akési počítadlo, ktoré umožňuje meniť hodnotu podľa zadaného kroku smerom nahor alebo nadol. Mnou zadaný krok je 0.01 a rozmedzie dovolených hodnôt odpovedá intervalu veľkosti parametra  $<0,1>$ .

Pravú spodnú časť grafického užívateľského rozhrania tvorí prehľad aktuálne nahraných snímok s nízkym dynamickým rozsahom. Ide o takzvané miniatúry, z ktorých bude zložená výsledná snímka s vysokým dynamickým rozsahom. Tieto miniatúry pomáhajú užívateľovi zvýšiť prehľadnosť pri viacnásobnom výbere snímok. Tento prvok sa nazýva **QListWidget** a objekty v ňom sú takzvané **QIcon**. Užívateľ má možnosť odstrániť alebo pridať snímky do tohto listu. Zoznam snímok v tomto liste odpovedá snímkam, ktoré budú použité pri tvorbe HDR.

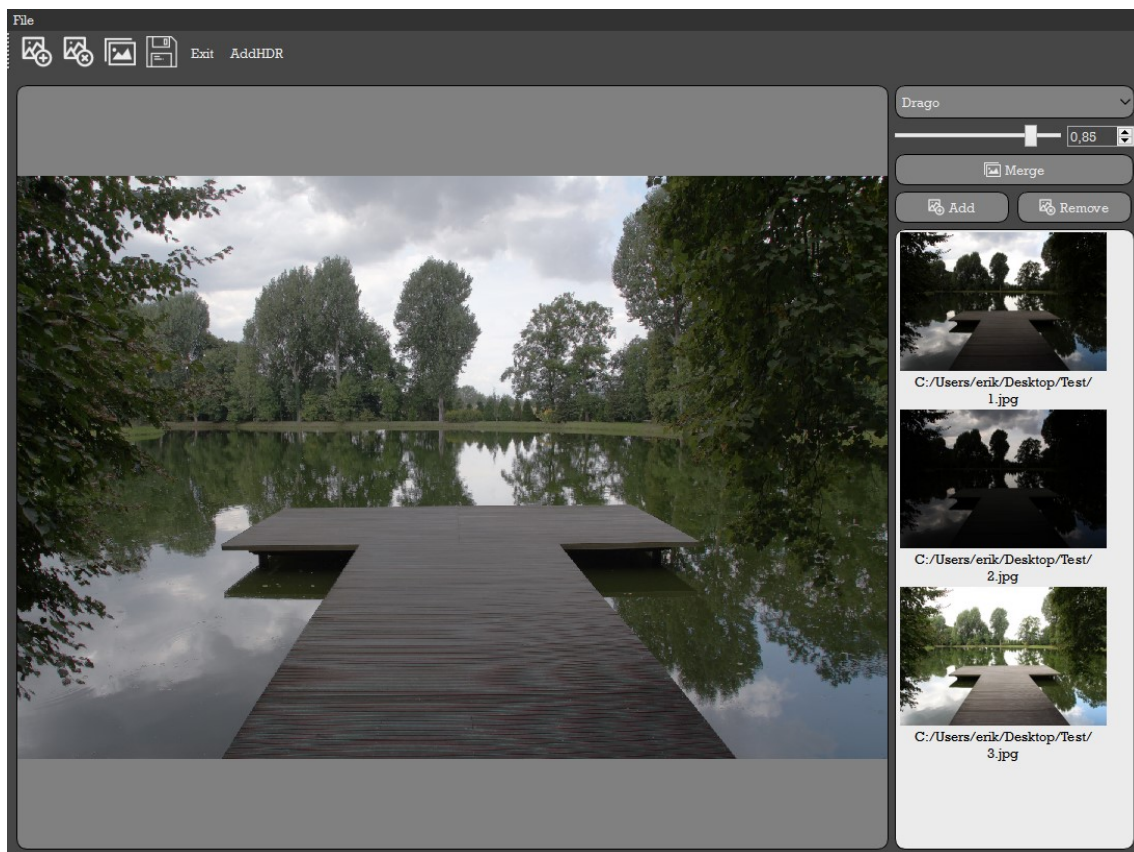
Pre zjednodušenie používania programu sa vo vrchnej časti nachádzajú všetky použiteľné funkcie v podobe tlačidiel **QToolButton**.



Obr. 4.1: Grafické užívateľské rozhranie programu

V prípade chyby, upozornenia alebo nesprávnej manipulácie s programom je užívateľ informovaný pomocou instance triedy **QMessageBox** s príslušným popisom.

Pri načítaní a ukladaní snímok sa otvorí užívateľovi okno, ktoré je instanciou triedy **QFileDialog** a umožňuje jednoduchú interakciu so súborami v počítači.



Obr. 4.2: Príklad Grafického užívateľského rozhrania programu s využitím Dragovho ope-  
rátoru

### 4.3 Implementácia algoritmov

Celková funkcionálnosť a práca jednotlivých algoritmov sa dá rozdeliť do viacerých samos-  
tátnych častí. Vstupno-výstupné operácie, skladanie sekvencie snímok a tónové mapovanie.  
V tejto sekcii bude detailne popísaná implementácia vyššie spomenutých častí.

#### Vstup

Pre načítanie LDR snímok je podporovaný formát **.jpg**. Pri možnosti načítania HDR snímky  
je podporovaný formát **(.hdr)**. Načítanie snímok prebieha za pomoci QT funkcie **QFile-**  
**Dialog**, ktorá nám umožní pohodlne uložiť si všetky potrebné adresy snímok.

Pre každú adresu je v prípade LDR snímok, následne pomocou funkcie **cv::imread()**  
nahraná snímka do štruktúry **cv::mat**. Expozičný čas je uložený v EXIF hlavičke snímku.  
Zo snímky je tento čas zistený pomocou knižnice **TinyEXIF**, konkrétne ide o instanciu  
triedy **EXIFInfo**, ktorej konštruktor je zavolaný s parametrom v podobe adresy snímky. Ak  
daná snímka neobsahuje expozičný čas, tak sa užívateľovi zobrazí okno s daným hlásením.  
Po úspešnom načítaní snímok sú všetky potrebné údaje uložené a následne využité pri  
vytváraní instance triedy **LowHDR**.

V prípade voľby HDR snímky je pomocou funkcie **RGBE\_ReadHeader()** načítaná  
hlavička a funkciou **RGBE\_ReadPixels\_RLE()** sú získané pixely snímky. Tieto infor-  
mácie sú následne použité pre vytvorenie matice s bitovou hĺbkou 8bitov na farebný kanál.

## Trieda LowHDR

Táto trieda tvorí základ pre uchovanie snímky s nízkym dynamickým rozsahom. Uchováva samotnú adresu snímky z dôvodu využitia pri **QListWidget** liste. Najdôležitejším parametrom je štruktúra **cv::mat**, ktorá uchováva dáta danej snímky. Je to štruktúra, ktorá je tvorená maticou s obrazovými bodmi typu **unsigned char** s hodnotami od 0 po 255, kde každý z týchto obrazových bodov je tvorený trojicou farebných kanálov. Tieto matice si ukladajú farebné kanály vo formáte BGR.

## Trieda HighHDR

Pre tvorbu HDR snímky je potrebná sekvencia snímok. Aby sme si dokázali ukladať viac snímok je využitý vektor, tvorený objektami typu **LowHDR**. Tento vektor je vstupným parametrom pri vytváraní instance triedy **HighHDR**, ktorá slúži pre uchovanie snímky s vysokým dynamickým rozsahom.

Pre vytvorenie snímky s vysokým dynamickým rozsahom je potrebné aby snímky boli minimálne 3 a mali rovnaké rozlíšenie. Toto je testované pomocou funkcií **testSize()** a **testResolution()**. V prípade nesplnenia týchto podmienok sa užívateľovi zobrazí okno s upozornením o konkrétnom probléme.

Samotné skladanie snímok prebieha za pomoci nasledujúcej rovnice 2.4. Samotný algoritmus využíva váhovú funkciu 2.5 vytvorenú takisto od Debevec a Malika, ktorá je v podstate pole s 256 položkami naplnené hodnotami podľa tejto funkcie. O vytvorenie váhovej funkcie sa stará funkcia **createWF()**. Pri samotnom skladaní snímok stačí iba získať hodnotu poľa odpovedajúcu práve spracovávaného pixelu. Samotný algoritmus skladania snímok je potrebné vykonať zvlášť pre každý farebný kanál, čiže trikrát. Hodnotu farebných kanálov získame zo štruktúry **Vec3b**. Je to vektor obsahujúci hodnotu farebných kanálov pre daný pixel typu **unsigned char**. Vytvorená matica obsahuje až 32bitov pre uloženie farebných kanálov. Dôvodom veľkosti tejto matice je fakt, že HDR snímky ukladajú svoju farbu vo veľkosti 8 bitov na farebný kanál. Zvyšných 8 bitov tvorí exponent. Celý algoritmus skladania snímok prebieha vo funkcii **mergeHdr()**. Táto funkcia prebieha po overení splnenia podmienky počtu snímok a rozlíšenia týchto snímok.

## Tónové mapovanie

Mapovanie HDR snímok prebieha pomocou jedného z dvoch operátorov (**Reinhardov**, **Dragov**) popísaných v sekcii 2.5.2. Každý z týchto operátorov tvorí samotnú triedu ( **OperatorReinhard** / **OperatorDrago** ). Pri mapovaní HDR snímky je vždy prepočítavaný každý pixel z HDR snímky pomocou vzorcov vybraného operátora a každý tento pixel je uložený do novo vytvorenej matice **cv::mat**, ktorá na rozdiel od matice pre HDR snímky obsahuje znova iba 8bitov. Pre každý pixel je potrebné vykonať daný algoritmus 3krát, keďže vždy pracujeme iba s jedným farebným kanálom. Prístup k samotným kanálom matice je pomocou štruktúry **Vec3f**, ktorá nám vráti vektor hodnôt typu float s 3 farebnými kanálmi. Výsledkom mapovania je matica typu **cv::mat**.

### • Reinhardov Operátor

Pri Reinhardovom operátore ide o triedu s názvom **OperatorReinhard** a funkciu **toneReinhard(double param)**. Vstupným parametrom tejto funkcie je hodnota kľúča

'a', podľa ktorého bude namapovaný jas snímky. Prvým krokom algoritmu je spočítanie sumy svetelnosti pixelov pre každý farebný kanál, ktorá sa následne využíva vo vzorci. Ďalej je potrebné nájsť maximálnu svetelnosť pre každý farebný kanál. Tento údaj je uložený do poľa s názvom **Lwhite**. Tieto výsledky sú dosadené do výsledného vzorca 2.9. Celý algoritmus prebieha v niekoľko-násobnom cykle **For**. Využitie cyklu je potrebné z dôvodu práce s celou maticou, respektíve so všetkými pixelami snímku podľa súradnice x a y. Výsledkom je nový pixel s odpovedajúcimi súradnicami, ktorý je následne uložený do novej matice typu **cv::mat**, avšak iba s 8bitmi určenými pre uloženie farieb.

- **Dragov Operátor**

Dragov operátor je implementovaný v triede **OperatorDrago**, konkrétne vo funkcii **toneDrago(double param)**. Vstupným parametrom tejto funkcie je 'b' hodnota, ktorá určuje kompresiu vysokých hodnôt a viditeľnosť detailov v tmavých miestach. Začiatočným krokom je zistenie priemernej svetelnosti pre každý farebný kanál a tiež zistenie maximálnej svetelnosti, ktorá je uložená do poľa lwhite. Následne je vykonaná normalizácia. Výsledné hodnoty sú dosadené do konečného vzorca 2.12. Tento algoritmus takisto prebieha v cykle **For**. Dôvod je rovnaký ako pri Reinhardovom operátore. Je nutné prejsť každý pixel snímky podľa súradníc x, y a následne uložiť nový pixel na odpovedajúce súradnice novej matice typu **cv::mat**, avšak iba s 8bitmi určenými pre uloženie farieb.

## Výstup

Po vykonaní algoritmu skladania snímok, respektíve po tónovom mapovaní je potrebné zmeniť poradie farebných kanálov danej matice. Štruktúra **cv::mat** pracuje s farebnými kanálmi v poradí BGR, avšak pre zobrazenie snímok na bežných monitoroch sa používa poradie RGB. Z tohoto dôvodu je využitá funkcia **cv::cvtColor(src cv::mat, dst cv::mat, COLOR\_BGR2RGB)**, kde posledný parameter určuje operáciu, ktorú chceme vykonať s farebnými kanálmi. Ide o prevod z poradia farebných kanálov BGR na poradie RGB. Podporovaným výstupným formátom pre namapovaný LDR snímok je **JPEG** a **RGBE radiance** formát pre HDR snímku. Pri ukladaní je využitý **QFileDialog**, ktorý užívateľovi pohodlne umožňuje určiť formát a názov súboru. Pri LDR snímkach je využitá na uloženie funkcia **cv::imwrite()**. Uloženie snímky vo formáte **Radiance RGBE** prebieha za pomoci knižnice RGBE. Ide o zdrojový súbor **rgbe.c** a hlavičkový súbor **rgbe.h**. Táto knižnica obsahuje predpripravené funkcie uľahčujúce uloženie HDR snímky vo formáte .hdr. Pre zapísanie hlavičky slúži funkcia **RGBE\_WriteHeader()**. Pre zápis pixelov respektíve matice za účelom vytvorenia snímky slúži funkcia **RGBE\_WritePixels()**.

Namapovaná LDR snímka je zobrazená v tomto programe pomocou grafického prvku **QLabel**. Keďže QT nepodporuje zobrazenie snímku priamo ako maticu tak je potrebné obrázok uložený v matici **cv::mat** najskôr previesť na štruktúru typu **QImage**, z ktorej je následne vytvorená štruktúra typu **QPixmap**, ktorú je možné pohodlne zobrazovať ako element **QLabel**.

## Kapitola 5

# Vyhodnotenie

V tejto časti budú zhodnotené výsledky z testovania programu. Zhodnotíme si časovú náročnosť rôznych operácií a budú tu porovnané výsledky tónovacích operátorov. Snímky boli zhotovené pomocou môjho fotoaparátu a pár ďalších bolo získaných z rôznych iných zdrojov z internetu. Série snímok som zhotovil v interiéri aj exteriéri, aby boli výsledky porovnávané pri rôznych scénach.

Testovanie rýchlosti sa dá rozdeliť do dvoch častí. Prvou časťou je skladanie sekvencie snímok. Druhú časť tvorí testovanie rýchlosti tónovacích operátorov.

Ďalším kritériom, ktoré má zmysel hodnotiť je kvalita výsledných HDR snímok podľa použitého tónovacieho operátora.

### Využitá technológia

Pre získanie snímok bol použitý môj vlastný fotoaparát Sony A6300. Ide o takzvanú bezrkadlovku (Mirrorless). Ide o pomerne nový a kvalitný fotoaparát, ktorý mi veľmi pomohol pri získaní potrebných snímok k testovaniu programu. Súčasťou tohto fotoaparátu bol aj objektív typu 16-50mm s clonou F3.5-5.6.

Popri tomto fotoaparáte bol využitý statív, aby som zabránil veľkému množstvu nezarovnaných snímok, ktoré by boli spôsobené fotografovaním z ruky.

Sekvencie snímok číslo 1 - Dedina a číslo 2 - Noc boli získané z internetového zdroja<sup>1</sup>. Ide o stránku aplikácie EasyHDR 2.7, ktorá ponúka snímky vhodné na využitie v programoch za účelom zloženia HDR snímky.

Sekvencie snímok číslo 3 - Interiér a číslo 4 - Strecha sú moje snímky, boli zhotovené pomocou režimu Autobracketing(AEB). Tento režim popísaný v časti 2.4.2 poslužil k rýchlemu a jednoduchému získaniu snímok s rôznou expozíciou. Konkrétne môj fotoaparát ponúkal možnosť zhotovenia 3, 5, 7 alebo 9 snímok. Ako krok expozície som si mohol vybrať hodnoty: 0.3EV, 0.5EV, 0.7EV, 1EV.

Tvorba programu, spracovanie snímok a všetky testy programu boli prevedené na notebooku MSI s procesorom Intel I7-5700HQ bežiacom na operačnom systéme Windows 8.1.

### 5.1 Vyhodnotenie rýchlosti

Testovanie rýchlosti bolo vykonané pomocou frameworku QT, konkrétne objektu **QTime**, boli využité funkcie **start()** pre začiatok testovania a **elapsed()** pre zistenie dĺžky behu

---

<sup>1</sup><https://www.easyhdr.com/examples/>

testovanej funkcie. Každé meranie prebehlo 5krát. Počet meraní postačoval k zisteniu plnohodnotných výsledkov, vzhľadom na to, že odchýlky meraní boli okolo 1%. Výsledok testovania je aritmetickým priemerom všetkých meraní. Veľkú úlohu pri testovaní zohrala knižnica OpenCV, kde práca s obrazom, respektíve maticami zrýchlila priebeh všetkých operácií.

## Rýchlosť skladania sekvencie snímok

Všetky snímky boli pri začiatku testovania uložené vo vektore. Jedná sa o čistý čas priebehu algoritmu skladania snímok. Ide o funkciu **mergeHdr()**. Rýchlosť skladania je priamo úmerná s počtom testovaných snímok a takisto s rozlíšením týchto snímok. Pri väčšom počte snímok, respektíve pri vyššom rozlíšení sa zvyšoval čas potrebný na vytvorenie HDR snímky. Výsledky testovania je možné vidieť v tabuľke 5.1. Časy sú uvedené v milisekundách.

	1 - Dedina	2 - Noc	3 - Interiér	4 - Strecha
Rozlíšenie	489x870	580x870	800x1200	1200x1800
Počet snímok	3	5	5	7
Čas zloženia	166	264	471	1470

Tabuľka 5.1: Tabuľka zameraná na testovanie rýchlosti zloženia snímok

Na základe meraní a vyhodnotenia výsledkov, je možné vidieť že rýchlosť zloženia snímok bola závislá na počte snímok a rozlíšenia týchto snímok. Medzi prvými dvoma meraniami sekvencie snímok je rozdiel približne 100 milisekúnd. Tieto snímky majú približne rovnaké rozlíšenie, avšak ich počet je o 2 väčší v druhom meraní, tento fakt mal za následok dlhšie vykonanie operácie. Medzi 2. a 3. sekvenciou snímok je rozdiel vyše 200 milisekúnd. Obidve sekvencie majú rovnaký počet snímok, avšak 3. sekvencia má väčšie rozlíšenie. Tento údaj nám dokazuje závislosť trvania operácie vzhľadom na rozlíšenie snímok. Posledné meranie bolo vykonané na 7 snímkoch, s rozlíšením 1200x1800. Operácia na týchto snímkach trvala niekoľko-násobne dlhšie ako na predchádzajúcich sekvenciách. Osobne si myslím, že pri bežnom používaní programu sú tieto hodnoty akceptovateľné. Na nasledujúcich obrázkoch (obr. 5.1, obr. 5.2) je možné vidieť výsledky mapovanie prvých dvoch sád snímok.





Obr. 5.1: Výsledok zloženia snímok a tónového mapovania sekvencie snímok 1 - Dedina, pomocou Dragovho operátora s parametrom  $b = 0.85$



Obr. 5.2: Výsledok zloženia snímok a tónového mapovania sekvencie snímok 2 - Noc, pomocou Dragovho operátora s parametrom  $b = 0.85$

## Rýchlosť tónovacích operátorov

Testovanie tónovacích operátorov prebehlo vo funkciách `toneReinhard()` a `toneDrago()`. Keďže tieto operátory prechádzajú pixel po pixeli, tak rýchlosť mapovania bola priamo úmerná s počtom pixelov čiže s rozlíšením HDR snímky.

Pri Reinhardovom operátore bola pri testovaní zvolená hodnota kľúča namapovaného jasu  $a = 0.50$ .

Pri Dragovom operátore bolo potrebné zvoliť hodnotu parametra  $b$ . Rozhodol som sa pre najpoužívanejšiu hodnotu  $b = 0.85$ . Výsledky testovania je možné vidieť v tabuľke 5.2. Časy sú uvedené v milisekundách.

	1 - Dedina	2 - Noc	3 - Interiér	4 - Strecha
Rozlíšenie	489x870	580x870	800x1200	1200x1800
Reinhard	49	57	110	242
Drago	291	346	643	1419

Tabuľka 5.2: Tabuľka zameraná na testovanie rýchlosti tónového mapovania

Predchádzajúca tabuľka nám ukazuje časovú náročnosť jednotlivých operátorov. Vo všeobecnosti môžeme povedať, že Dragov operátor bol priemerne 6krát náročnejší na výkon z pohľadu časovej efektivity. Oba operátory sú priamo závislé na veľkosti snímok a s pribúdajúcou veľkosťou narastá aj dĺžka vykonávania operácie. Namerané hodnoty nie sú extra vysoké a pri bežnom používaní by nemali užívateľa zdržiavať pri práci.

## 5.2 Porovnanie operátorov

V tejto časti budú popísané základné rozdiely, ktoré je možné spozorovať medzi operátormi. Tento pohľad bude do istej miery subjektívny, keďže v umeleckom smere akým sú fotografie má každý človek vlastný názor a každé hodnotenie viacerých snímok môže byť do istej miery subjektívne. Ďalší pohľad bude zameraný na zhodnotenie vytvorených histogramov<sup>2</sup>, kde je možné štatisticky si porovnať výsledné hodnoty jasu porovnávaných snímok.

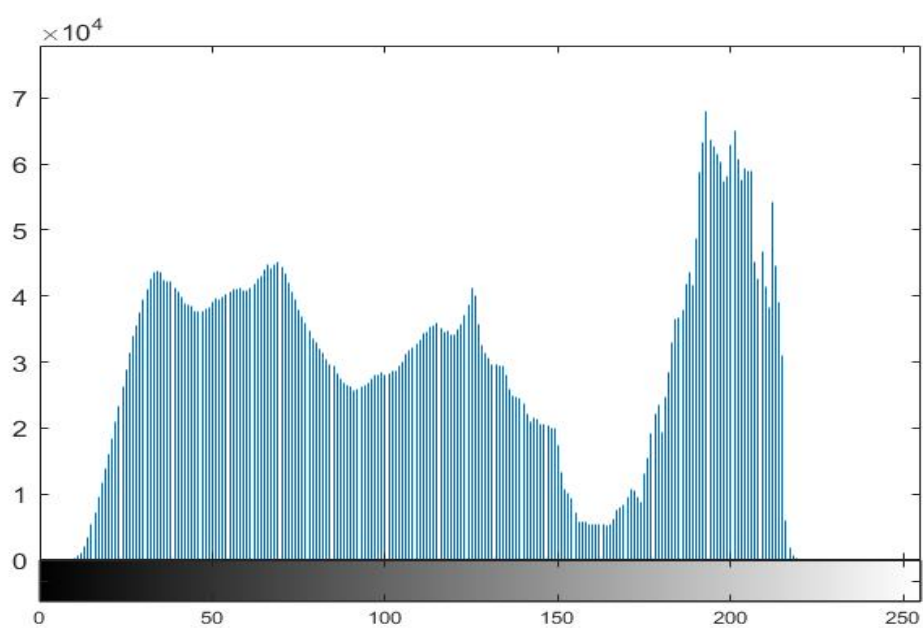
Všetky výsledné HDR snímky boli uložené vo formáte .hdr a otestované aj pomocou opensource programu LuminanceHDR. Výsledky snímok namapovaných v LuminanceHDR a výsledky zobrazené v mnou vytvorenom programe boli viac menej identické alebo veľmi podobné. Oba operátory dosahovali pomerne slušné výsledky, avšak podľa môjho osobného názoru lepšie výsledky dosahoval Dragov operátor (výsledok na obr. 5.5). Išlo predovšetkým o svetlé časti snímky, ktoré v konečnom dôsledku vytvárali krajší dojem z fotografie. Naopak Reinhardov operátor (výsledok na obr. 5.3) na mňa pôsobil lepšie v tmavších častiach snímky, aj keď si myslím, že hlavným dôvodom bola možnosť voľby parametra určujúceho kľúčovú hodnotu jasu. Z pohľadu celkového dojmu je možné povedať, že snímka namapovaná pomocou Reinhardovho operátora pôsobí výrazne svetlejším dojmom, keďže pri Dragovom operátore pôsobia niektoré časti príliš tmavo.

<sup>2</sup>štatistické grafické zobrazenie frekvencií výskytu bodov s určitou jasovou hodnotou





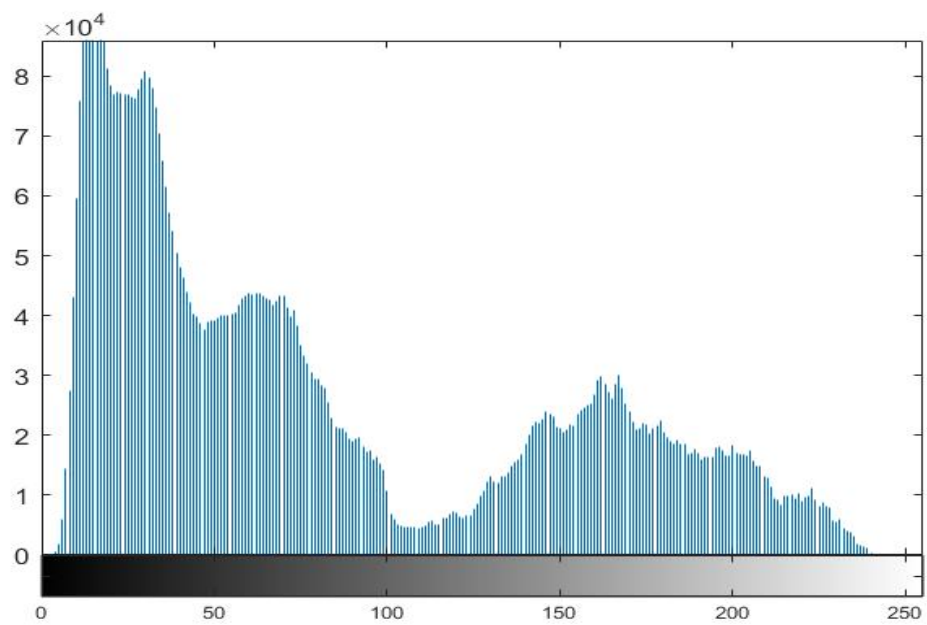
Obr. 5.3: Výsledok zloženia snímok a tónového mapovania sekvencie snímok 4 - Strecha, pomocou Reinhardovho operátora s parametrom  $a = 0.80$



Obr. 5.4: Histogram snímky 4 - Strecha vytvorenej pomocou Reinhardovho operátora s parametrom  $a = 0.80$



Obr. 5.5: Výsledok zloženia snímok a následného tónového mapovania sekvencie snímok 4 - Strecha, pomocou Dragovho operátora s parametrom  $b = 0.85$



Obr. 5.6: Histogram snímky 4 - Strecha vytvorenej pomocou Dragovho operátora s parametrom  $b = 0.85$

## Porovnanie Histogramov

Výsledné histogramy nám štatisticky dokazujú, že pri použití Reinhardovho a Dragovho operátora je možné vidieť výrazný rozdiel vo frekvencií výskytu bodov s určitými jasovými hodnotami. Na histograme snímky namapovanej pomocou Reinhardovho operátora 5.4 je možné vidieť, že vyváženie histogramu je vcelku rovnomerné s mierne zvýšeným počtom bodov so svetlejším jasom. Naopak pri využití Dragovho operátora nám histogram 5.6 ukazuje zvýšenú hustotu bodov s nízkou hodnotou jasu. Výsledkom porovnania týchto histogramov je fakt, že využitie Dragovho operátora zanechalo zvýšený počet bodov s nízkou hodnotou jasu.

## Nežiadúce efekty

Najpočetnejším nežiadúcim efektom, ktorý som spozoroval pri testovaní bol vznik rozmazaných častí snímky. Tieto rozmazania vznikli aj napriek použitiu statívu s funkciou autobrac-keting. Hlavným dôvodom boli menšie pohyby spôsobené pri stlačení spúšte. V konečnom dôsledku vznik intenzívnejších rozmazaní spôsobil aj väčší počet snímok, ktoré boli využité pre skladanie. Konkrétne som spozoroval problém hlavne v testovanej sade snímok číslo 4 - Interiér (výsledok na obr. 5.7).



Obr. 5.7: Výsledok zloženia 5 snímok a následného tónového mapovania sekvencie snímok 3 - Interiér, pomocou Reinhardovho operátora s parametrom  $b = 0.85$

## Kapitola 6

### Záver

Úlohou tejto bakalárskej práce bolo preštudovať problematiku zloženia sekvencie LDR snímok za účelom tvorby HDR snímky a následné využitie Tone-mappingu.

Na základe tejto problematiky, ktorá je podrobne popísaná v tomto texte bol vytvorený program, ktorý dokáže vytvoriť HDR snímku zo série LDR snímok alebo priamo načítať HDR snímku z počítača. Ďalšou časťou tohto programu je možnosť následne snímku namapovať na snímku zobraziteľnú na bežných displejoch. Pri mapovaní je možné využiť jeden z dvoch globálnych tónovacích operátorov - Reinhardov a Dragov. Pri Reinhardovom operátore je možnosť zvoliť hodnotu parametra určujúceho svetelnosť scény a pri Dragovom operátore je možnosť voľby parametra, ktorý určuje viditeľnosť detailov v tmavých miestach snímky. Súčasťou implementácie tohto programu je aj grafické užívateľské rozhranie.

Program je napísaný v objektovo orientovanom jazyku C++ v spojení s frameworkom QT, ktorý umožňoval tvorbu grafického užívateľského rozhrania. Súčasťou implementácie bolo využitie knižníc ako OpenCV, TinyExif, RGBE. Po vytvorení aplikácie nasledovalo testovanie za pomoci série snímok, z ktorých väčšina bola zhotovených pomocou vlastného fotoaparátu. Tieto testy sa venovali sledovaniu a porovnávaniu rýchlosti zloženia snímok a dĺžky trvania tónového mapovania jednotlivých operátorov. Testovanie aplikácie poukázalo, že dĺžka trvania zloženia snímok, respektíve tónového mapovania sa exponenciálne zvyšuje s narastajúcim počtom snímok respektíve so zvyšujúcim sa rozlíšením snímok. Avšak aj pri vyššom počte snímok s vyšším rozlíšením bola táto doba akceptovateľná. Súčasťou testovania bolo aj porovnanie výsledkov operátorov pri tónovom mapovaní. Keďže ide o globálne operátory výsledky týchto operátorov nie sú také kvalitné, aké by boli dosiahnuté pri použití lokálnych operátorov. Najväčší rozdiel som spozoroval medzi svetlými a tmavými miestami snímky. Kým Dragov operátor si lepšie poradil so svetlými miestami, Reinhardov operátor dokázal zobraziť viac detailov v tmavých častiach snímky.

Jedno z rozšírení tohto programu, ktoré som implementoval, je možnosť načítať HDR snímku priamo z počítača a následne ju namapovať podľa zvoleného operátora. Avšak momentálne sa ponúka veľké množstvo ďalších rozšírení tohto programu. Jedným z možných rozšírení je pridanie počtu tónovacích operátorov. Za zmienku by určite stála implementácia niektorého z lokálnych operátorov, ktoré dosahujú výborné výsledky pri Tone-Mappingu a po ich použití namapovaná snímka pôsobí krajším dojmom. Ďalšou z možností rozšírenia tejto aplikácie by bola implementácia funkcií na odstránenie nežiadúcich efektov, s ktorými sa pri tvorbe HDR snímok stretávame veľmi často. Predovšetkým by mohlo ísť o metódu deghosting, čiže odstránenie duchov. Ďalšími možnými metódami by mohla byť možnosť zarovnania snímok, poprípade metóda na odstránenie halo efektu. Implementácia týchto metód by uľahčila prácu s HDR snímkami a dovolila užívateľovi využiť ich potenciál vo

väčšej miere. Jednou z možností ako rozšíriť potencionalny počet užívateľov tejto aplikácie by bolo pridanie rôznych nástrojov na úpravu fotiek ako jas, saturácia, kontrast, poprípade úprava konkrétnych farieb.

Celkovo pojem HDR sa v dnešnom svete stáva čoraz populárnejší. Táto práca zachytáva len malú časť toho, ako ďaleko sú dnešné technológie v spracovaní HDR obrazu a čo všetko už o HDR vieme. Za zmienku určite stojí momentálny pokrok v zobrazení HDR videa. V dnešnej dobe technológie dovoľujú zobraziť vyšší dynamický rozsah a práve preto sa pojem HDR stáva celosvetovo populárnym. V nasledujúcich rokoch môžeme očakávať prudký nárast výskytu týchto technológií medzi bežnými užívateľmi.

# Literatúra

- [1] Color spaces. Online, [cit. 17.4.2018].  
URL <https://www.color-management-guide.com/color-spaces.html>
- [2] How Cameras Work-The Parts of a Camera. Online, [cit. 17.4.2018].  
URL <http://www.easybasicphotography.com/the-camera.html>
- [3] Čo je Svetlo? Online, [cit. 17.4.2018].  
URL <http://www.uspornaziarovka.sk/pages/%C4%8Co-je-Svetlo%3F.html>
- [4] Top 20 Best HDR Software Review 2018. Online, [cit. 24.4.2018].  
URL <https://captainkimo.com/hdr-software-review-comparison/>
- [5] Andrej Bočík, M. B., Hana Majerová: *Velká kniha HDR fotografie : kouzlo fotografií s vysokým dynamickým rozsahem*. Brno : Computer Press, 2011, ISBN 9788025133675.
- [6] Banterle, F.; Artusi, A.; Debattista, K.; aj.: *Advanced High Dynamic Range Imaging: Theory and Practice*. Taylor & Francis, 2011, ISBN 9781568817194.
- [7] Chips, I.: HDRC® – MORE THAN YOU CAN SEE. Online, [cit. 17.4.2018].  
URL [https://www.ims-chips.de/content/pdf/text/HDRC\\_Imager\\_Camera\\_Feature3.pdf](https://www.ims-chips.de/content/pdf/text/HDRC_Imager_Camera_Feature3.pdf)
- [8] Debevec, P. E.; Malik, J.: Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. 1997: s. 369–378, online,[cit. 17.4.2018].  
URL <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>
- [9] Donnelly, J.; Massa, N.: *Light: Introduction to Optics and Photonics*. New England Board of Higher Education, 2010, ISBN 9780981531809.
- [10] Drago, F.; Myszkowski, K.; Annen, T.; aj.: Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes. *Computer Graphics Forum*, 2003, ISSN 1467-8659, online, cit. [22.4.2018].  
URL <http://resources.mpi-inf.mpg.de/tmo/logmap/logmap.pdf>
- [11] Hoefflinger, B.: *High-Dynamic-Range (HDR) Vision: Microelectronics, Image Processing, Computer Graphics*. Springer Series in Advanced Microelectronics, Springer Berlin Heidelberg, 2007, ISBN 9783540444336.
- [12] Pihan, R.: Clona a vše kolem ní. 2006, online, [cit. 17.4.2018].  
URL <https://www.digimanie.cz/fotoskola-4dil-clona-a-vse-kolem-ni/1316>

- [13] Reinhard, E.; Heidrich, W.; Debevec, P.; aj.: *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*. Morgan Kaufmann series in computer graphics, Elsevier Science, 2010, ISBN 9780080957111.
- [14] Reinhard, E.; Stark, M.; Shirley, P.; aj.: Photographic Tone Reproduction for Digital Images. *ACM Trans. Graph.*, ročník 21, č. 3, Červenec 2002: s. 267–276, ISSN 0730-0301, online,[cit. 20.4.2018].  
URL <https://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/tonemap.pdf>
- [15] Rowse, D.: Automatic Exposure Bracketing (AEB). Online, [cit. 17.4.2018].  
URL <https://digital-photography-school.com/automatic-exposure-bracketing-aeb/>
- [16] Traub, R.: What is hdr photography? Then and now. 2015, online, [cit. 19.4.2018].  
URL <https://www.enlightapp.com/blog/what-is-hdr-photography-then-and-now/>
- [17] Triggs, R.: HDR display technology: Everything you need to know. 2017, online, [cit. 19.4.2018].  
URL <https://www.androidauthority.com/what-is-a-hdr-display-757159/>
- [18] WebMD: Vision Basics: How Does Your Eye Work? Online[cit. 15.4.2018].  
URL <https://www.webmd.com/eye-health/amazing-human-eye>
- [19] Yuen, C.: OLED vs LED LCD: Which is the best display technology. Online,[cit. 17.4.2018].  
URL <http://www.trustedreviews.com/opinion/oled-vs-led-lcd-2924602>



## Príloha A

# Obsah priloženého pamäťového média

Súčasťou tejto práce je aj priložené CD s nasledujúcimi zložkami:

- **HDRApp** – Zdrojové kódy vytvoreného programu, návod a prostriedky na jeho spustenie
- **Test** – Snímky využité na testovanie vytvorenej aplikácie
- **Documents** – Vytvorený pdf súbor tejto práce
- **Latex** – Zdrojové kódy textovej časti(Latex)